

## 유한 요소법을 이용한 중소하천 유역에서의 이동호우에 대한 유출특성 분석

조현경·이영화·최윤영\*

영남전문대학 토목과·경산대학교 환경과학과·영남대학교 토목공학과\*\*  
(1997년 11월 26일 접수)

### Analysis of Runoff Characteristics for Moving Storms on Small River Basin using Finite Element Method

Hyeon-Kyeong Cho, Yeung-Hwa Lee\*, and Yun-Yeong Choi\*\*

\*Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Junior College

\*\*Dept. of Environmental Science, Kyungsan Univ.

\*\*\*Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

(Manuscript received 26 November 1997)

In the rainfall-runoff relation, consideration of the spatial movement of storms is very important in designing a hydraulic structure or evaluating an environmental influence for land usage. Because of this reason, this study has suggested the finite element model which consider the spatial movement of a storm and it was applied on a small river basin(Wi stream basin). In the application of the model, the basin was treated as a pivot point and the storms are simulated with movement in each directions.

As a result, it shows that the storms moving from north to south have bigger peak discharge and faster peak time than the storms moving in other directions. So these characteristics have to be considered in the designation of a hydraulic structure or evaluation of an environmental influence.

Key words : rainfall-runoff relation, spatial movement, finite element model

#### 1. 서 론

어떤 유역의 수공구조물을 설계한다든가 또는 토지이용에 대한 환경영과를 하는데 있어서 흥수량 및 수위 등의 수문량을 산정하는 과정이 반드시 필요하며, 이를 위해서 많이 이용되는 것이 강우-유출 모형이다. 이러한 강우-유출 모형은 유역의 물리적인 상태를 실제와 거의 유사하게 수학적으로 표현이 가능하여야 하며, 그렇게 하여야만 다양한 강우조건에 대한 유출의 신뢰성 있는 계산치와 공간적으로 다양한 결과를 얻을 수 있다.

이러한 유출현상은 지표면유출과 하도유출로 나누어 계산할 수 있으며, 이들 유출현상을 해석하는 방법은 크게 선형과 비선형으로 구분하고 있다. 그러나 이를 해석하고 처리하는데 있어서 실제 적용상의 어려움 때문에 일반적으로 선형 근사를 지향해 오고 있다. 유출계의 선형 해석은 Sherman이 단위유량도법을 발표한 이래 Snyder의 합성단위유량도법, 순간단위유량도법의 이론이 Clark(1945), Nash(1957) 등에 의해 연구 발표되었고, 한편 유출계의 비선형해석에 있어서는 Lighthill과 Whitham(1955)의 Kinematic Wave법, Wiener(1942)의 Volterra-Wiener Series법 등이 발표되었다. 그러나 유출해석의 실제적용에 있어서 강한 비선형계인 강우-유

출 과정을 선형 또는 비선형의 정보제어 이론이나 예측이론을 무리하게 적용함으로써 오히려 모형의 복잡성을 초래하고 효율성을 저하시키는 경향이 있었다.

이에 대응하는 하나의 방법으로써 요즘 새로이 대두된 것이 유출과정을 연속방정식과 운동량 방정식을 사용하여 정의하고 유한차분법이나 유한요소법을 사용하여 이를 편미분지배방정식의 해를 얻는 방법이다. 이러한 연구는 국내외적으로 다양하게 시도되고 있는데, 먼저 국외의 연구로는 Judah(1973)가 유한요소법을 이용하여 자연하천 유역에서 유출수분곡선을 모의한 바 있으며, 그 뒤를 이어 Ross 등(1979), Blandford와 Meadows(1984)가 유한요소법을 적용하여 유출량을 산정한 바 있다. 그리고 국내의 연구동향을 보면 최진규 등(1992)이 유한요소법을 이용하여 연하천 유역의 유출량을 산정한 바 있으며, 조현경 등(1996)이 중소하천유역에 유한요소모형을 적용한 바 있다.

그러나 이러한 연구들은 호우의 가장 큰 특징인 공간적 변동성을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 강우-유출 모형에 호우의 공간적 변동성을 고려한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 국내외의 연구로는 Marcus(1991)가 소유역에

서 이동호우에 대하여 유한요소모형을 적용한 바 있고, 안승섭(1996)이 낙동강유역에서 태풍경로별 유출특성을 분석한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 최근 활발히 시도되고 있는 유한요소법을 이용한 유출모형을 이동호우에 적용시켜 첨두유출량 및 첨두발생시간 등을 산정하여 유역의 수공구조물을 설계한다든가 홍수조절계획을 수립하는데 있어서 실체적인 도움을 주고자 하는데 그 목적이 있다.

## 2. 모형의 기본이론

### 2.1 지표면 및 하도흐름에 관한 식

2차원 지표면 및 하도유출 과정에 관한 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 연속방정식은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(q_y) = E \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 수심,  $q_x$ 는  $x$ 방향의 단위폭당 유량,  $q_y$ 는  $y$ 방향의 단위폭당 유량,  $E$ 는 초과강우량,  $t$ 는 시간이다.

그리고 운동량 방정식은 다음 식(2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$x$ 방향의 운동량 :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{u}{h} E = g(S_x - S_{fx}) \quad (2)$$

$y$ 방향의 운동량 :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{v}{h} E = g(S_y - S_{fy}) \quad (3)$$

여기서,  $u$ 와  $v$ 는 각각  $x$ ,  $y$ 방향의 평균유속,  $g$ 는 중력가속도,  $S_x$ 와  $S_y$ 는 각각  $x$ ,  $y$ 방향의 하상경사,  $S_{fx}$ 와  $S_{fy}$ 는  $x$ ,  $y$ 방향의 에너지경사이다.

윗 식(1)~(3)은 지표면 유출과 폭이 넓은 하도에 대한 비선형 편미분방정식인데 일반적으로 단순화시켜 수치해법으로 이 방정식을 풀어 근사해를 구한다. 또한 Woolhis-er와 Liggett(1967)는 지표면 유출문제에 Kinematic Wave식을 적용하였다. 이 때 운동량 방정식에서 중력항과 마찰력항을 제외한 다른 항들은 무시하였다. 따라서 식(2)와 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_x = S_{fx} \quad (4)$$

$$S_y = S_{fy} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)는 총류와 난류영역에 대한 저항관계로 나타낼 수 있으며, 이를 저항식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_x = Ch^M S_x S^{L-1} \quad (6)$$

$$q_y = Ch^M S_y S^{L-1} \quad (7)$$

여기서,  $q_x$ 와  $q_y$ 는  $x$ 와  $y$ 방향의 단위폭당 유량이고,  $S = \sqrt{(S_x)^2 + (S_y)^2}$ 이며,  $C, M, L$ 은 총류와 난류시의 흐름특성을 반영하는 계수들이다.

식(1)에 식(6)과 (7)을 대입하면 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Ch^M S_x S^{L-1}) + \frac{\partial}{\partial y}(Ch^M S_y S^{L-1}) = E \quad (8)$$

윗 식에서  $\beta_x = CS_x S^{L-1}$ ,  $\beta_y = CS_y S^{L-1}$ 라 놓으면, 다음 식(9)와 같이 다시 쓸 수 있다.

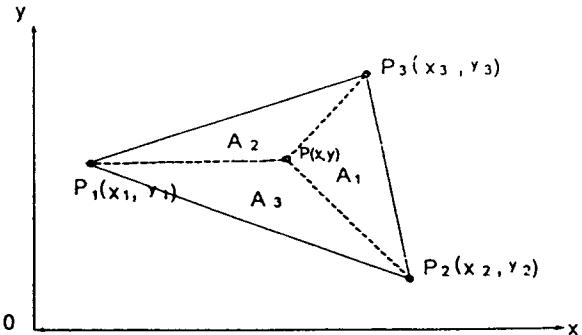


Fig. 1. Division of Domain.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta_x h^M) + \frac{\partial}{\partial y}(\beta_y h^M) = E \quad (9)$$

윗 식(9)는 2차원 흐름에 대한 기본식이다. 본 연구에서는 이 식을 공간영역에 대한 매개변수를 갖는 등방성(Isoparametric) 유한요소법을 사용하여 해를 구하였다.

### 2.2 지표면 및 하도흐름의 유한요소식

#### 2.2.1 Galerkin법을 사용한 공간 차분화

다음 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 공간영역은 삼각형 또는 사각형 형태의 많은 요소로 분할된다. 요소의 형태에 따라 미지변수의 값은 요소의 절점(Node), 변 또는 내부에서 계산된다. 요소내에서 미지변수의 값은 보간함수를 이용하여 구할 수 있다.

식(8)의 변수  $h$ 는 거리  $x, y$ 와 시간  $t$ 를 변화시킴으로써 구할 수 있다.

$$h(x, y, t) = h^*(x, y, t) = \sum_{i=1}^m h_i(t) \bar{N}_i(x, y) \quad (10)$$

여기서,  $\bar{N}_i(x, y)$ 는 꼭지점  $i(x, y)$ 에서의 전역보간함수(Global Interpolation Function)이다. 그리고 변수  $C, S_x, S_y, E$ 의 공간적 변동성은 매개변수를 갖는 등방성 유한요소 개념을 사용하여 나타낼 수 있다. 입력자료를 요소에 할당하지 않고 꼭지점에 할당하는 이 개념은 계산된 종속변수의 불연속성을 제거하는 잇점이 있다.

식(9)에서  $\beta_x, \beta_y$ 의 공간적 변동성은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$beta_x(x, y) = \sum_{i=1}^m \beta_{xi} \bar{N}_i(x, y) \quad (11)$$

$$\beta_y(x, y) = \sum_{i=1}^m \beta_{yi} \bar{N}_i(x, y) \quad (12)$$

그리고 초과강우량도 동일한 방법으로 나타내면 다음과 같다.

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^m E_i \bar{N}_i(x, y) \quad (13)$$

절점의 표고  $Z(x, y)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^m Z_i \bar{N}_i(x, y) \quad (14)$$

식(14)를  $x$  및  $y$ 방향에 대해 미분하면 경사  $S_x$ 와  $S_y$ 는 다음과 같이 된다.

$$S_x(x) = -\frac{\partial Z}{\partial x} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial \bar{N}_i}{\partial x} Z_i \quad (15)$$

Table 1. Green-Ampt Parameters for Soil Types

Soil Texture	Total Porosity $\phi$	Effective Porosity $\theta_c$	Wetting Front Capillary Pressure $S$ (cm)	Hydraulic Conductivity $K_s$ (cm/hr)
Sand	0.437 (0.374~0.500)	0.417 (0.354~0.480)	4.05 (0.97~25.36)	11.78
Loamy Sand	0.436 (0.363~0.506)	6.13 (1.35~27.94)	6.13 (0.35~27.94)	2.99
Sand Loam	0.453 (0.351~0.555)	0.412 (0.283~0.541)	11.01 (11.01~45.47)	1.09
Loam	0.463 (0.420~0.582)	0.434 (0.334~0.534)	8.89 (1.35~59.38)	0.34
Silt Loam	0.501 (0.420~0.582)	0.486 (0.394~0.578)	16.68 (2.92~95.39)	0.65
Sand Clay Loam	0.398 (0.332~0.464)	0.330 (0.235~0.425)	21.85 (4.42~108.0)	0.15
Clay Loam	0.464 (0.409~0.519)	0.309 (0.279~0.501)	20.88 (4.79~91.10)	0.10
Silty Clay Loam	0.471 (0.418~0.524)	0.432 (0.347~0.517)	27.30 (5.67~131.50)	0.10
Sand Clay	0.430 (0.370~0.490)	0.321 (0.207~0.435)	23.90 (4.08~140.2)	0.06
Silt Clay	0.479 (0.425~0.533)	0.423 (0.334~0.512)	29.22 (6.13~139.4)	0.05
Caly	0.475 (0.427~0.523)	0.385 (0.269~0.501)	31.63 (6.39~156.50)	0.03

\* ( ) : 유효범위

$$S_y(y) = -\frac{\partial Z}{\partial y} = \sum_{i=1}^{m^2} \bar{N}_i Z_i \quad (16)$$

경계조건 :  
 $h(x,y,t) = 0$  유역분수계에서 0      (20)

식(9)는 도함수내에서 변수의 공간적인 변동성을 설명하기 위해 다음과 같이 확장하여 나타낼 수 있다.

$$(\frac{\partial h}{\partial t}) + (\beta_x M h^{M-1} \frac{\partial h}{\partial x} + h^M \frac{\partial \beta_x}{\partial x})$$

$$+ (\beta_y M h^{M-1} \frac{\partial h}{\partial y} + h^M \frac{\partial \beta_y}{\partial y}) = E \quad (17)$$

식(17)에 Galerkin 가중간차법을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\int_D [\bar{N}]^T [R(x,y,t)] dD = 0 \quad (18)$$

여기서,  $[\bar{N}]^T$ 는 전역보간함수의 전치행렬이고,  $[R(x,y,t)]$ 는 근사해법을 사용함으로써 발생하는 잔차이며,  $D$ 는 Solution Domain이다.

### 2.2.2 초기 및 경계조건

본 연구에서 사용된 지표면 흐름에 대한 지배방정식은 2차원 쌍곡선함수이다. 이런 종류의 방정식에서 임의의 양의 전파방향은 하류방향이다. 따라서 2차원 지표면 및 하도유출 과정에 관한 지배방정식의 해를 구하기 위하여 초기 및 경계조건을 다음과 같이 두었다.

#### 초기조건 :

$$h(x,y,t) = h(x,y,0) = \text{매우 작은 상수값} \quad (19)$$

### 3. 초과강우량의 산정

일반적으로 침투과정은 다음과 같은 두 단계로 구별하여 설명할 수 있다. 첫번째 단계는 강우가 포화수리전도도(飽和水理傳導度, Saturated Hydraulic Conductivity)보다는 크지만 침투능력보다는 작은 경우이다. 이 경우 모든 강우는 지하로 침투하지만 최고 상부토양층에서의 토양습윤량은 증가한다. 두번째 단계는 강우강도가 침투량보다 더 클 때 시작되며, 이 순간이 지표면이 포화되는 시기이든지 지표면저류가 시작되는 시기이고 그 때부터 유출이 발생한다. 그리고 강우가 계속됨에 따라 침투율은 시간에 따라 감소하고 포화수리전도도에 접근한다. 강우강도가 포화수리전도도 보다 더 작을 경우에는 지표면이 포화되지 않고 강우는 모두 침투하게 된다.

이러한 침투특성을 나타내는 방법으로써 본 연구에서는 Darcy법칙을 응용한 물리적인 침투모형인 Green-Ampt 방법을 채택하였으며, 그 관계식은 다음 식(21)과 같다.

$$f = \frac{dF}{dt} = K_s + \frac{K_s S \cdot M}{F} = K_s (1 + \frac{S \cdot M}{F}) \quad (21)$$

여기서,  $f$ 는 침투율,  $F$ 는 누가침투량,  $K_s$ 는 포화수리전

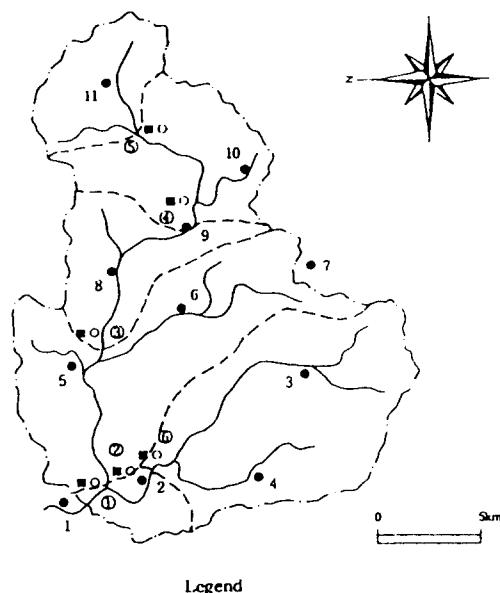


Fig. 2. Study River Basin(Wi Stream).

도도,  $S$ 는 습윤전선에서의 흡입수두,  $M$ 은 유효공극율에  
서 초기토양함수율을 뺀 값이다.

또한 Green-Ampt식을 적용하기 위해서는  $K, M, S$ 를  
추정하여야 하며, 이들 매개변수들은 현지에서 계측되거나 토양습윤자료로부터 계산될 수 있다. 그러나 이들 일반 하천유역에서는 이들 자료가 불충분하여 이들 매개변수들을 구하기가 매우 어려운 실정이다. 따라서 Green-Ampt식의 매개변수를 실측하지 않고도 토양자료로부터 추정할 수 있도록 하기 위한 방법들이 연구되어 왔다. 먼저 Brooks와 Corey(1964)는 토양습윤자료를 이용하여 모관압과 토양수 사이의 관계를 수학적으로 정의한 바 있으며, 이 관계에서 토양자료로부터 습윤전선에서의 흡입수두  $S$ 의 값을 얻을 수 있었다. 그리고 Brakensiek 등(1981)은 Brooks와 Corey(1964)의 수학적 관계로부터 Green-Ampt식의 매개변수를 결정하기 위한 방법을 제시한 바 있다. 또한 Rawls 등(1983)은 미국에서 5,000 여개 유역의 토양을 해석하여 각종 매개변수의 유효범위 및 평균치를 추정하였으며, Table 1은 Rawls 등(1983)이 결정한 토양성질에 따른 Green-Ampt 방정식의 매개변수값이다.

#### 4. 모형의 적용 및 분석

##### 4.1 대상유역 및 분석자료

본 연구에서는 이동호우에 대한 유출해석을 위하여

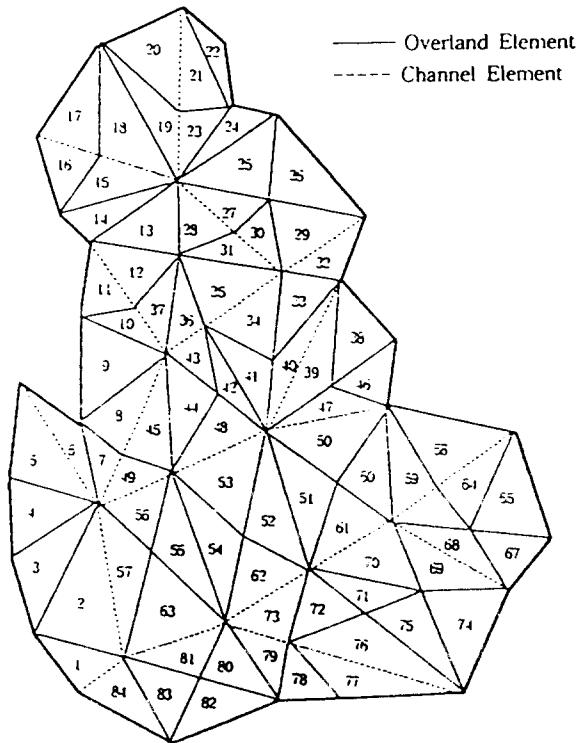


Fig. 3. Division of Wi Stream Basin.

IHP대표유역 중의 하나인 낙동강수계 위천유역을 연구 대상 유역으로 선정하였으며, 대상유역의 유역도는 Fig. 2에 나타내었다. 선정된 위천유역은 11개의 자기 우량 관측소와 6개의 자기 수위관측소가 있어서 강우 및 유출자료가 비교적 정밀하게 관측되고 있으며, 1982년부터 1997년 현재까지 수문관측이 실시되어 왔다.

위천유역의 하천수계 구성은 Fig. 2와 같이 본류와 비교적 큰 1개의 지류로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 유역(하도 포함)을 크게 6개 소유역으로 구분하고 유한 요소법을 적용하기 위해서 이를 다시 여러 개의 요소로 구분하였다. 유출량 산정지점은 위천유역의 특성을 잘 나타내는 유역출구점인 무성지점을 포함하여 6개 지점을 선정하였다. 본 유역은 유로연장 42.83 km, 유역면적 472.53 km<sup>2</sup>인 유역으로 유역 전반에 걸쳐 지표 및 하도경사가 급한 지역으로 유출해석에 필요한 지형인자를 구하기 위하여 1/25,000 및 1/50,000 축척의 지형도를 이용하였다. 또한 1982년부터 1997년까지의 IHP 보고서로부터 시간강우량과 시간홍수량 자료를 수집하여 분석에 사용하였다.

#### 4.2 유역의 분할

전절에서 설명된 유한요소모형이 시·공간적으로 변화하는 호우 및 유역조건으로부터 발생되는 유출량의 수치해를 얻기 위해서 사용되었다. 유한요소모형을 적용하기 위해서 대상유역을 지형도와 하도망에 따라 소유역 단위의 유출시스템으로 분할하였다. 이 때 분할되는 소유역의 수는 모형의 정확도, 유역의 동질성, 계산

Table 2. Green-Ampt Parameters on Soil Types in Wi Stream Basin

Soil Type No.	SCS Hydrologic Group	Soil Texture	Effective Porosity $\theta_e$	Wetting Front Capillary Pressure $S(\text{cm})$	Hydraulic Conductivity $K_s(\text{cm}/\text{hr})$
1	A	Sand	0.428	4.86	11.78
2	A/B	Loamy Sand	8.261	7.29	2.99
3	B	Sand Loam	0.425	16.29	1.09
4	C	Loam	0.462	13.21	0.34
5	C/D	Silt Loam	0.492	22.78	0.65
6	D	Clay	0.406	37.21	0.03

Table 3. Percentage Area of Soil Types and Estimated Initial Water Content in Wi Stream Basin

Soil Type No.	SCS Hydrologic Group	Area ( $\text{km}^2$ )	Percentage (%)	Initial Water Content
1	A	232.553	49.21	0.29
2	A/B	82.782	17.51	0.31
3	B	37.450	7.93	0.33
4	C	41.894	8.87	0.36
5	C/D	26.251	5.56	0.38
6	D	51.600	10.92	0.42

시간 등에 따라 고려하였다.

본 연구에서 지표면은 지형을 비교적 잘 나타낼 수 있는 내부절점이 없는 삼각형 요소, 하도는 1차 직선요소를 사용하였다. 이때 모형을 적용하기 위한 유역의 분할은 등고선을 중심으로 지형적인 면을 고려하여 나타내었다. 조현경등(1996)이 이전에 수행한 연구에서 동일한 대상유역을 39개의 소유역과 18개의 하도로 분할한 바 있었다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 대상유역을 84개의 소유역과 28개의 하도로 나누어 더욱 세밀하게 분석하였다. 그리고 유역에 대한 자료로  $x, y$ 좌표, 표고, 초과강우량, 조도계수값이 각 절점에 할당된다.

#### 4.3 모형의 매개변수 추정

Green-Ampt 방정식을 적용하기 위해서는  $K_s$ ,  $M$ 과  $S$ 를 추정하는 것이 필요하다. 이들 매개변수들은 측정되거나 토양습률자료로부터 계산될 수 있는데, 본 위천 유역에서는 기존의 관측된 자료가 없기 때문에 Table 1의 Rawls 등(1983)이 제시한 토양성질에 따른 Green-Ampt 매개변수 관계표를 이용하여 구하였으며, 그 결과는 Table 2 및 3과 같았다.

#### 4.4 모형의 검증(Verification)

모형의 검증을 위해 대상유역에서 발생한 호우사상들을 본 연구에서 제시한 유한요소모형에 적용시켰으며, 그 결과 첨두유량 부분에서 실측치보다 계산치가 조금씩 크게 나타나나 첨두발생 시작이나 수문곡선의 상승부와 하강부에서의 증감양상이 거의 일치하는 것으로

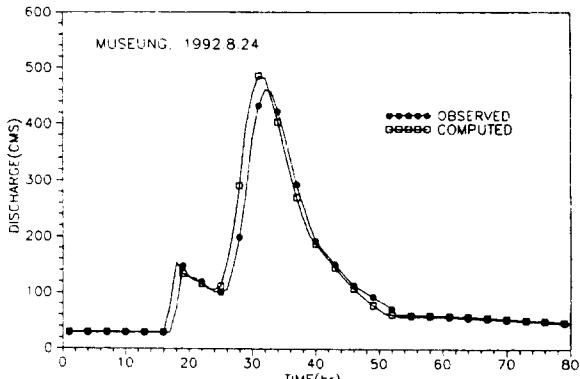


Fig. 4. Comparisons of Computed Hydrograph (1992. 8. 24. Storm).

나타났다. 여기서는 대표로 유역의 출구점인 무성지점을 대상으로 1992년 8월 24일 호우에 대해 모형을 수행한 결과를 다음 Fig. 4와 같이 나타내었다. 이들 호우자료에 적용시켜서 얻은 계산 첨두유량과 관측 첨두유량, 계산 총유출량과 관측 총유출량 관계를 도시한 결과, 다음 Fig. 5와 같이 첨두유량과 총유출량이 작을 때는 비교적 우수한 결과를 얻었으나, 클 때는 다소 오차가 발생되었다.

#### 4.5 이동호우에 대한 모형의 적용

##### 4.5.1 가상 이동호우에 대한 유출특성 분석

호우의 이동경로에 따른 유출특성분석을 위하여 총량

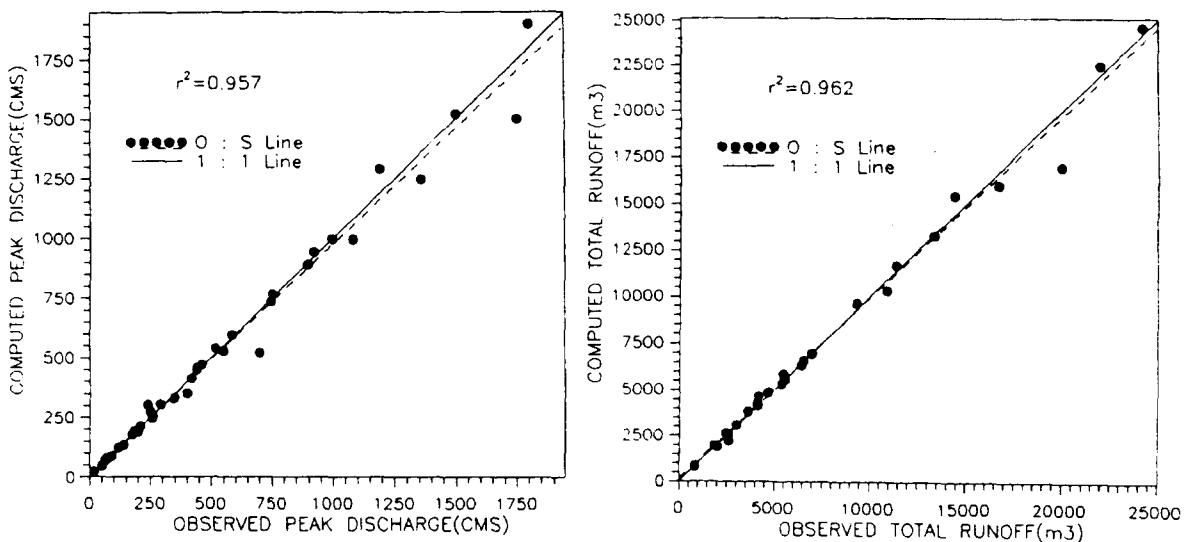


Fig. 5. Comparisons of Computed and Observed Value.

Table 4. Results of Runoff Characteristics for Hypothetical Storm by Moving Directions

Storm Directions	Characteristics	Hypothetical Rainfall		
		100 mm/day	150 mm/day	200 mm/day
S → N	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /sec)	511	816	1,109
	$T_p$ (hrs)	20:10	19:52	19:39
SW → NE	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /sec)	537	829	1,121
	$T_p$ (hrs)	20:05	19:47	19:34
W → E	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /sec)	566	859	1,142
	$T_p$ (hrs)	19:59	19:41	19:30
NW → SE	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /sec)	582	872	1,158
	$T_p$ (hrs)	19:53	19:38	19:26
N → S	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /sec)	598	889	1,187
	$T_p$ (hrs)	19:50	19:32	19:21

100 mm/day, 150 mm/day 및 200 mm/day의 가상의 이동호우를 Huff 방법으로 분포(1990)시켜 유역의 남쪽에서 북쪽으로 이동하는 경우, 유역의 남서쪽에서 북동쪽으로 이동하는 경우, 유역의 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 경우, 유역의 북서쪽에서 남동쪽으로 이동하는 경우 및 유역의 북쪽에서 남쪽으로 이동하는 경우로 구분하여 비교 검토하였다. 그 결과 가상 이동호우의 이동방향별 첨두유출량 및 첨두발생시간을 유역의 하류단에 위치한 무성지점을 기준으로 검토하면 Table 4 및 Fig. 6과 같았다.

먼저, 가상호우 100 mm/day가 유역의 남쪽에서 진입하여 북쪽으로 이동할 경우의 첨두유출량은 511CMS, 첨두발생시간은 20:10이고, 유역의 남서쪽에서 진입하여 북동쪽으로 이동할 경우의 첨두유출량은 537CMS, 첨두발생시간은 20:05이며, 유역의 서쪽에서 진입하여 동쪽으로 이동할 경우의 첨두유출량은 566CMS, 첨두발생시간은 19:59이었다. 그리고 유역의 북서쪽에서 진입하여 남동쪽으로 이동할 경우의 첨두유출량은 582CMS, 첨두발생시간은 19:53이고, 유역의 북쪽에서 진입하여 남쪽으로 이동할 경우의 첨두유출량은 598CMS, 첨두발생시간은 19:50으로 나타났다. 따라서

여러 진행방향중에서 유역의 북쪽에서 남쪽으로 이동할 경우에 첨두유출량은 가장 커지면서 유출수문곡선의 형태는 점예하게 되고 첨두발생시간이 빨라짐을 알 수 있다.

다음으로 가상호우 150 mm/day가 발생할 경우의 호우의 이동방향별 유출특성을 검토해보면 첨두유출량은 남쪽에서 북쪽, 남서쪽에서 북동쪽, 서쪽에서 동쪽, 북서쪽에서 남동쪽, 북쪽에서 남쪽으로 각각 816, 829, 859, 872 및 889CMS로 분석되어 호우가 유역의 북쪽에서 남쪽으로 진행하는 경우가 첨두유출량은 가장 커지면서 수문곡선이 점예해짐을 알 수 있었다. 그리고 첨두발생시간을 검토하면 남쪽에서 북쪽, 남서쪽에서 북동쪽, 서쪽에서 동쪽, 북서쪽에서 남동쪽, 북쪽에서 남쪽으로 각각 19:52, 19:47, 19:41, 19:36 및 19:32로 분석되어 북쪽에서 남쪽으로 이동시에 첨두발생시간이 가장 빨라지는 것을 알 수 있다.

또한 예측호우 200 mm/day가 발생할 경우의 호우의 이동방향별 유출특성을 검토하면 첨두유출량은 남쪽에서 북쪽, 남서쪽에서 북동쪽, 서쪽에서 동쪽, 북서쪽에서 남동쪽, 북쪽에서 남쪽으로 각각 1,109, 1,121, 1,142, 1,158 및 1,187CMS로 분석되어 호우가 유역의

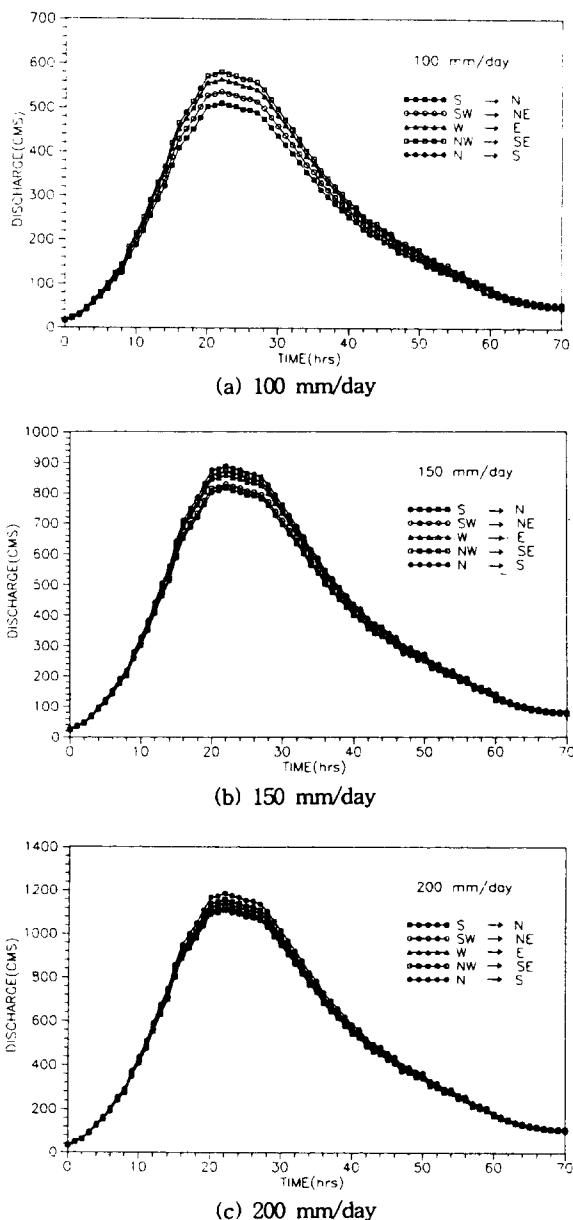


Fig. 6. Comparisons of Hypothetical Storm by Moving Directions.

북쪽에서 남쪽으로 진행하는 경우가 첨두유출량은 가장 커지면서 수문곡선이 첨두발생점을 알 수 있었다. 또한 첨두발생시간을 검토하면 남쪽에서 북쪽, 남서쪽에서 북동쪽, 서쪽에서 동쪽, 북서쪽에서 남동쪽, 북쪽에서 남

쪽으로 각각 19:39, 19:34, 19:30, 19:26 및 19:21로 분석되어 북쪽에서 남쪽으로 이동시에 첨두발생시간이 가장 빨라지는 것을 알 수 있다.

따라서 이러한 결과로 볼 때 동일한 호우가 유역의 북쪽에서 남쪽방향으로 진행하면서 발생할 경우 첨두유출량이 가장 커짐은 물론 첨두발생시간이 가장 빨라지는 것으로 분석되어 남쪽에서 북쪽으로 진행하는 경우보다 홍수피해에 대한 위험이 큼을 알 수 있다.

#### 4.5.2 실제 이동호우에 대한 유출특성 분석

실제호우에 대한 호우경로별 유출특성 분석을 위하여 본 연구에서 이론 전개한 유한요소모형을 이용하였다. 여기서, 대상호우는 1983년 6월 20일 호우와 1984년 9월 2일 호우를 선택하였다. 이 때 1983년 6월 20일 호우의 이동경로는 대체로 북쪽에서 남쪽이었으며, 1984년 9월 2일 호우는 대체로 남쪽에서 북쪽으로 호우가 이동하였다(Fig. 7. 참조).

적용 결과 호우의 이동방향에 따른 본류 주요 지점별 첨두유출량과 첨두발생시간은 Table 5와 같이 변화가 큰 것으로 분석되었으며, 이를 두 호우는 규모와 그 당시 토양함수조건의 상이함 때문에 직접적인 변화특성을 비교 분석하기는 어려우나, 대체적인 경향과 전절의 가상 이동호우에 대한 결과로 유추해볼 때 호우의 진행방향이 유역의 북쪽에서 남쪽으로 진행하는 경우에 홍수수문곡선의 형태가 다른 방향의 이동호우 때보다 홍수수문곡선의 첨두부분이 크고 첨두발생시간도 빠름을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 하천유역에서 이동호우시 발생하는 유출현상을 해석하기 위하여 요한요소법을 이용한 유출모형을 적용하여 수문량을 계산하였으며, 이를 관측자료와 비교 분석함으로써 그 적용성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 사용된 유한요소모형을 적용하기 위하여 유역을 삼각망으로 구성하고, 84개의 지표면요소와 28개의 하도요소로 나누었다.

2) 모형에 사용된 매개변수들을 유역의 지형도, 유역의 토양, 식생 및 토지이용 등의 자료를 이용하여 추정하였다.

3) 유한요소모형을 검증한 결과 첨두유량 부분에서 실측치보다 모의치가 조금씩 크게 나타나나 첨두발생시각이나 수문곡선의 상승부와 하강부에서의 증감양상이 거의 일치하는 것으로 나타나 그 적용성을 확인하였다.

4) 호우의 이동경로에 따른 유출특성분석을 위하여

Table 5. Results of Runoff Characteristics for Actual Storm by Moving Directions

Storms	Directions	Characteristics	Gauging Stations		
			No.1(MUSEUNG)	No.3(MISEUNG)	No.4(KONO)
1983. 6. 20.	N → S	$Q_p(\text{m}^3/\text{sec})$	362	56	32
		$T_p(\text{hrs})$	18	15	12
1984. 9. 2.	S → N	$Q_p(\text{m}^3/\text{sec})$	1,268	456	343
		$T_p(\text{hrs})$	19	16	13

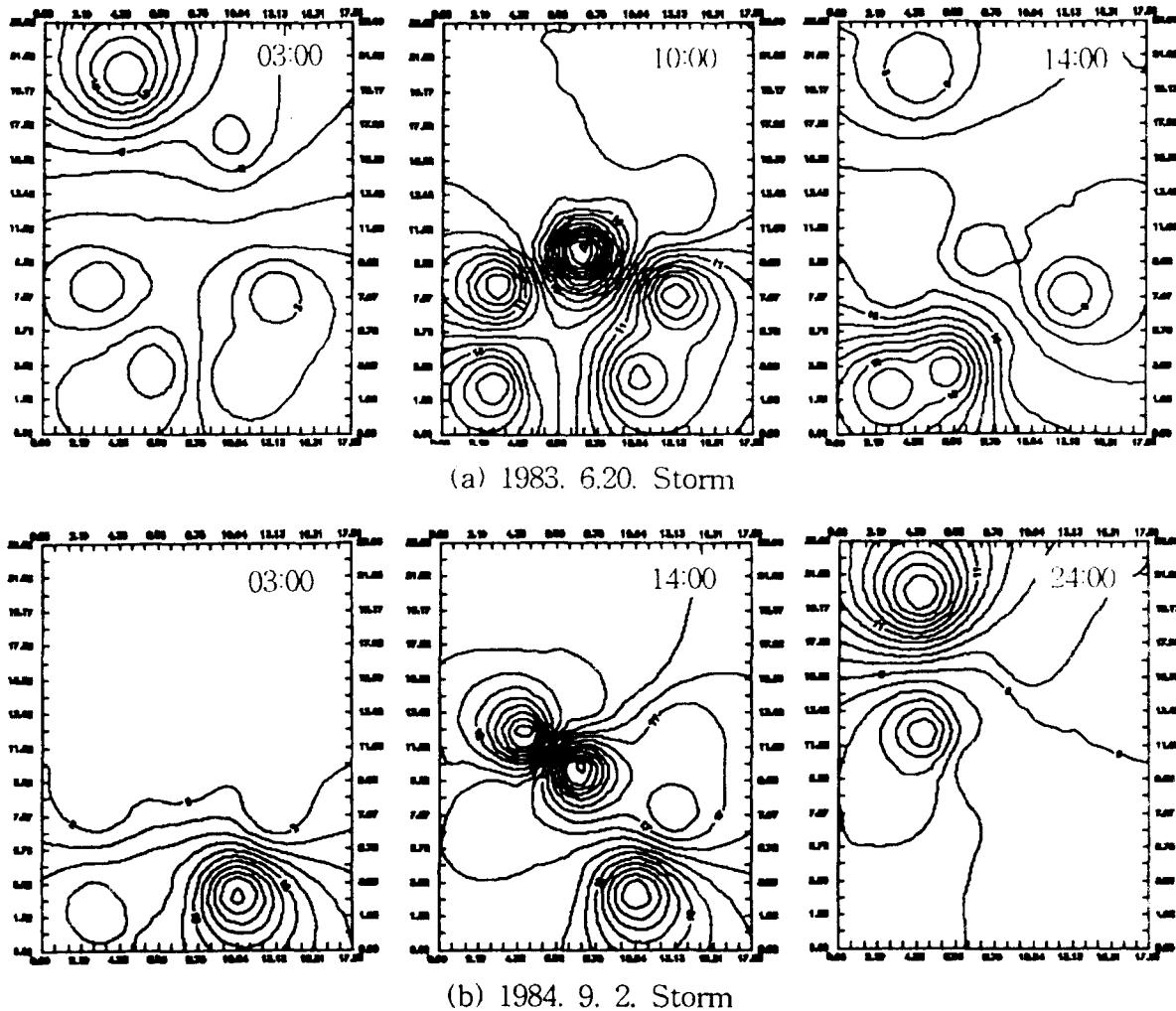


Fig. 7. Moving Directions of Actual Storms.

총량 100 mm/day, 150 mm/day 및 200 mm/day의 가상의 이동호우를 Huff 방법으로 분포시켜 유역의 남쪽에서 북쪽으로 이동하는 경우, 유역의 남서쪽에서 북동쪽으로 이동하는 경우, 유역의 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 경우, 유역의 북서쪽에서 남동쪽으로 이동하는 경우 및 유역의 북쪽에서 남쪽으로 이동하는 경우로 구분하여 비교 검토하였다. 그 결과 동일한 호우가 유역의 북쪽에서 남쪽방향으로 진행하면서 발생할 경우 첨두유출량이 가장 커짐은 물론 첨두발생시간이 가장 빨라지는 것으로 분석되어 남쪽에서 북쪽으로 진행하는 경우보다 홍수피해에 대한 위험이 큼을 알 수 있었다.

5) 실제호우에 대한 호우경로별 유출특성 분석을 위하여 유한요소모형을 적용한 결과 실제호우의 규모와 그 당시 토양함수조건의 상이함 때문에 적절적인 변화 특성을 비교 분석하기는 어려우나, 대체적인 경향과 가상 이동호우에 대한 결과로 유추해볼 때 호우의 진행방향이 유역의 북쪽에서 남쪽으로 진행하는 경우에 유출수문곡선의 형태가 다른 방향의 이동호우 때보다 유출

수문곡선의 첨두부분이 크고 첨두발생시간도 빠름을 알 수 있다.

따라서 이러한 결과로 볼 때 유출량을 산정하는데 있어서 호우의 이동방향을 고려하는 것이 상당히 중요하다는 것을 알 수 있으며, 유역의 수공구조물을 설계한다면 홍수조절계획을 수립하는데 있어서 실제적으로 반드시 필요하다고 판단된다.

[참고] 본 연구에서 방향이라는 것은 유역의 상류를 북쪽, 하류를 남쪽으로 한 상대적인 방향입니다. 실제로 본 연구의 대상유역인 위천유역은 대체로 상류가 동쪽이고 하류가 서쪽입니다.

#### 참 고 문 헌

안승섭, 1996, 낙동강유역의 태풍경로별 호우발생특성 및 유출특성 분석, 한국농공학회지, 제38권, 제5호, pp.64~73.

조현경, 이순탁, 1996, 중소하천유역에서의 유출현상 해석을 위한 유한요소 모델링, 영남대학교 공업기

- 술연구소, 제24권, 제2호, pp.1~6.
- 최진규, 손재원, 1992, 유한요소법에 의한 소유역 유출 모형의 적용, 한국수문학회지, 제25권 제3호, pp. 97~104.
- 한국수자원공사, 1990, 낙동강수계 다목적댐 연계운영 방안 연구(2차) 보고서.
- Blansford, G.E., and Meadows, M.E., 1984, Finite Element Simulation of Kinematic Surface Runoff, Finite Elements in Water Resources, Proc. 5th Int. Conf., Burlington, VT, Springer-Verlag, New York, pp.153~164.
- Brakensiek, D.L., Engleman, R.L., Rawls, W.J., 1981, Variation within Texture Classes of Soil Water Parameters, Trans. Am. Soc. Agric. Eng., Vol.24, No.2, pp.335~339.
- Brooks, R.H., and Corey, A.T., 1964, Hydraulic Properties of Porous Media, Hydrology Paper No.3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Clark, C.O., 1945, Storage and the Unit Hydrograph, Trans. of ASCE, Vol.110, Paper No. 2261, 1945, pp.1419~1446.
- Judah, O.M., 1973, Simulation of Runoff Hydrograph from Natural Watershed by Finite Element Method, Ph. D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va.
- Lighthil, M.J., and Whithn, G.B., 1955, On Kinematic Waves I , Flood Movements in Long Rivers, Royal Soc. London Proc. A., Vol.227, pp.286~316.
- Marcus, K.B., 1991, Two-Dimensional Finite Element Modeling of Surface Runoff from Moving Storms on Small Watersheds, Ph.D. Dissertation, Colorado State University.
- Nash, J.E., 1957, The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph, Intern. Assoc. Soic. Hydrology, Pub.45, Vol.3, pp.114~121.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Miller, N., 1983, Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data, J. Hydraul. Div., Am. Soc. Eng., Vol.109, No.1, pp.62~70.
- Ross, E.B., Contractor, D.N. and Shanholtz, V., 1979, A Finite Element Model of Overland and Channel Flow for Assessing the Hydrologic Impact of Land Use Change, J. Hydrol., Vol.41, pp.11~30.
- Winer, N., 1942, Response of a Non-Linear Device to Noise, Radiation Lab., MIT Report, No.129.
- Woolhiser, D.A., and J.A. Liggett, 1967, Unsteady One Dimensional Flow over a Plane - the Rising Hydrograph, Water Resources Research, Vol.3, No.3, pp.753~771.