

## 지형공간 특성자료를 이용한 하천유역의 강우-유출해석

안 승 섭 · 이 증 석 · 도 준 현\*  
경일대학교 건설공학부 · 경일대학교 대학원  
(2003년 6월 17일 접수; 2003년 7월 25일 채택)

### Rainfall-Runoff Analysis of River Basin Using Spatial Data

Seung-Seop Ahn, Jeung-Seok Lee and Jun-Hyeon Do\*  
School of Construction Engineering, Kyungil University, Daegu 712-701, Korea  
\*Graduate School, Kyungil University, Daegu 712-701, Korea  
(Manuscript received 17 June, 2003; accepted 25 July, 2003)

The subject basin of the research was the basin of Yeongcheon Dam located in the upper reaches of the Kumho River. The parameters of the model were derived from the results of abstracting topological properties out of rainfall-runoff observation data about heavy rains and Digital Elevation Modeling(DEM) materials. This research aimed at suggesting the applicability of the CELLMOD Model, a distribution-type model, in interpreting runoff based on the topological properties of a river basin, by carrying out runoff interpretation for heavy rains using the model.

To examine the applicability of the model, the calculated peaking characteristics in the hydrograph was analyzed in comparison with observed values and interpretation results by the Clark Model.

According to the result of analysis using the CELLMOD Model proposed in the present research for interpreting the rainfall-runoff process, the model reduced the physical uncertainty in the rainfall-runoff process, and consequently, generated improved results in forecasting river runoff. Therefore it was concluded that the algorithm is appropriate for interpreting rainfall-runoff in river basins. However, to enhance accuracy in interpreting rainfall-runoff, it is necessary to supplement heavy rain patterns in subject basins and to subdivide a basin into minor basins for analysis. In addition, it is necessary to apply the model to basins that have sufficient observation data, and to identify the correlation between model parameters and the basin characteristics(channel characteristics).

Key words : Rainfall-Runoff Analysis

#### 1. 서 론

오늘날 인구의 증가와 더불어 산업의 급격한 발달로 인하여 하천유역에 있어서의 수문환경은 급격히 변모하게 되었다. 실제의 강우-유출현상에 가장 근접한 해석 모형의 개선과 개발을 위해서는 유역의 지형공간특성자료와 수문특성 자료가 사용되며, 이들 자료의 정확한 추출과 모델 매개변수의 다양한 정보를 활용하기 위한 노력이 계속되고 있는 실

정이다.

수문학에서 사용되는 모형은 확정론적 모형과 추계학적 모형, 사용된 변수가 시간적인 모형과 공간적인 모형, 물리적인 모형과 경험적 모형 등 여러 가지로 분류될 수 있다. 그리고, 물의 순환과정 중 침투, 지표하유출 또는 지하수유출 등의 과정변수의 공간적변화를 무시하느냐 혹은 고려하느냐에 따라 총괄적 모형(Lumped Model)과 분포형 모형(Distributed Model)로 분류할 수 있다.

총괄형 모형은 주어진 지역 이상의 유역 특징을 통합하는 식으로 유출상태를 간략히 나타내는 모형으로 총괄적 변수 모델은 보통의 유역의 계산결과에 대한 정확한 예측을 이끄는 공간적으로 다양한

Corresponding Author : Seung-Seop Ahn, School of Construction Engineering, Kyungil University, Daegu 712-701, Korea  
Phone : +82-53-850-7314  
E-mail : ahnssso@kiu.ac.kr

변수의 대표적인 하나의 값을 얻기 어렵다. 또한, 물리적으로 기초된 정확한 변수 값의 적용문제는 그 범위가 작아서 모델의 공간적 다양성의 혼합이 어렵다. 일반적으로 과정, 입력자료, 경계층 조건, 유역의 기하학적 특성등의 공간적인 변수를 고려하지 않는 상미분 방정식으로 나타내며, 어떤 과정들은 간단한 수리학적 법칙에 기초를 둔 미분방정식과 실험적이고 대수학적인 미분방정식으로 표현한다. 총괄형 모형에는 HEC-1(Hydrologic Engineering Center)모형<sup>1)</sup>, Tank모형<sup>2,3)</sup>, SSARR 모형(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model)<sup>4)</sup>와 최근의 HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modeling System)<sup>5)</sup>, WMS(Watershed Modeling System)<sup>6)</sup> 등이 있다. 국내에서는 이용수<sup>7)</sup>에 의해 수문학적 모의모형인 SSARR모형을 이용하여 소유역의 유출분석을 실시하였으며, 김중훈<sup>8)</sup>은 HEC-1모형을 대하천유역에 적용성 검토를 실시하였다. 최근에는 여러 모형과 신경망을 이용하여 강우-유출 비교분석을 실시하여 수문곡선을 예측한 경우도 있다.

분포형 모형은 유역을 여러 개의 소유역으로 구분함으로써 유역의 특성인자 및 물리적으로 의미가 있는 수문과정 변수의 공간적 변화를 고려하며 개개 소유역별로 모의한 후 유역전반에 걸쳐 합성함으로써 전유역의 수문학적 반응을 알 수 있다. 실제 소유역 특성의 다양성을 표현하기 위해 발전하여 왔으며, 물체표면의 정밀사진, 배수밀도, 토양침투의 정도, 지형학 그리고 강우와 유역상황을 특징짓는데 사용되고 있다. 이런 모형들은 과정, 입력자료, 경계층 조건, 유역의 특성 등의 공간적인 변수를 고려할

수 있으나 현장에서의 실험과 자료부족은 분포형 모형을 일반화시키는데 제한이 따른다. 대부분의 경우 유역특성, 과정, 입력자료 등이 총괄적이고 결과와 직접적으로 관련된 과정들은 분포적이므로 완전한 분포형이 아닌 반 분포형이다. 이런 모형은 SHE (European Hydrologic System Model)<sup>9,10)</sup>, SWMM (Storm Water Management Model)<sup>11)</sup>과 CELLMOD (Cell Models)<sup>12,13)</sup>등이 있다. 국내에서는 이증석 등<sup>14,15)</sup>과 임민수<sup>16)</sup>의 분포형 모형을 이용하여 강우-유출 분석하여 홍수를 예측하였다.

본 연구에서는 강우-유출해석시에 총괄적 모형이 가지는 단점을 보완하기 위하여 개발된 분포형 모형(CELLMOD 모형)의 적용성을 검토하였다. 적용 모형의 검정을 위하여 금호강 최상류에 위치한 영천댐 유역을 대상으로 하여 기존에 홍수유출해석에 널리 이용되고있는 총괄형 모형인 Clark 모형의 해석결과와 관측자료를 이용하여 비교·검토하였다.

## 2. 강우-유출해석모형의 기본이론

본 연구에서는 강우-유출 해석을 위하여 분포형 모형인 CELLMOD모형을 이용하였다. 이 모형은 Diskin과 Simpson(1978)에 의해 소개된 이후 Arizona Tucson에 위치하고 있는 미 농무성 농업연구소 수자원센터(United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service, USDA-ARS, Watershed Rearch Center)의 M.H. Diskin 박사에 의해 개선된 모형으로서, 강우를 직접 지표유출로 전환하는 반선형, 매개변수형, 반분포형 추적모형이다.

이 모형의 일반적인 구조는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 전체 유역의 각각 특징한 부분의 셀 단위가

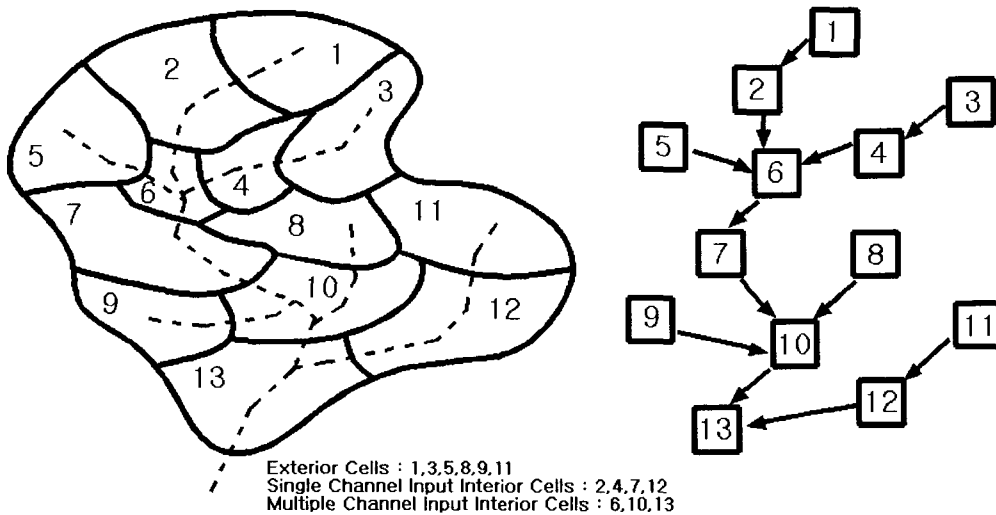


Fig. 1. Schematic diagram of CELLMOD(Arnon Karnieli, 1988).

내부적으로 서로 연결되어진 연속된 구조를 가지고 있으며, 셀의 형태는 외부셀(exterior cells)과 내부셀(interior cells) 및 다중셀(multiple cells)로 구별된다.

먼저, 각 관측소로부터 얻은 총우량을 초과우량으로 환산하기 위하여 식 (1)과 같은 Green & Ampt 침투방정식을 사용한다.

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

여기서,  $F$ 는  $t$ 시간에서의 누가침투고[L],  $f$ 는 침투율[ $LT^{-1}$ ],  $K_s$ 는 전이지대에서의 포화수리전도도[ $LT^{-1}$ ],  $SM$ 은 유효 Matric Potential[L]을 나타낸다. 이 식은 불안정한 강우조건하에서의 침투나 초과강우량의 계산을 위해서 1971년과 1973년 Mein과 Larson에 의해 수정되어졌으며, 그 후에 1978년 Chu에 의해 불안정한 강우 조건하에서도 사용할 수 있도록 확장되어졌다.

다음으로, 각 셀의 초과강우량을 이용한 지표유출 계산은 식(2)와 같이 연속된 한 쌍의 비동일 선형저수지 추적을 통하여 단위도 종거  $U_i$ 를 구하게 된다.

$$U_i = \int_0^1 \frac{1}{K_1} e^{-\tau} \cdot \frac{1}{K_2} e^{-\tau K_2} = \frac{e^{-\frac{1}{K_1}} - e^{-\frac{1}{K_2}}}{K_1 - K_2} \quad (2)$$

여기서,  $K_1$  및  $K_2$ 은 첫 번째 및 두 번째 저수

지의 저류계수를 나타내며 모형의 수행을 위하여 식(3)-(4)와 같이 두 번째 저수지 저류계수는 첫 번째 저수지 저류계수의 0.1배로 하고 저류계수  $K$ 는 각 셀 면적의 제곱근에 비례한다고 가정하였다.

$$K_2 = 0.1 K_1 \quad (3)$$

$$K = AKC\sqrt{\frac{AC(j)}{AM}} \quad (4)$$

여기서,  $AM$ 은 모든 셀의 평균면적[ $L^2$ ],  $AC(j)$ 는 셀의 면적[ $L^2$ ],  $AKC$ 는 평균면적에 따른 저류계수[T]이다.

식(3)을 식(2)에 대입하면 단위도는 식(5)와 같다.

$$U_i = \frac{e^{-\frac{1}{K_1}} - e^{-\frac{10}{K_1}}}{0.9 K_1} \quad (5)$$

각각의 내부 셀에 맞는 지표유출 수문곡선은 그 셀의 하도유출 수문곡선과 결합하여 셀의 총유출 수문곡선의 형태로 나타나게 되는데, 이 유출 수문도는 다음 셀의 하도유입 수문곡선의 일부가 되거나, 다음 셀이 단일 하도유입셀일 경우에는 완전한 하도유입 수문곡선이 된다.

마지막으로, 하도 유출량에 대한 추적은 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 하도 지체( $\tau_c$ )와 하도저류계수( $K_c$ )를 고려하여 계산하게 되며, 하도손실량은 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 일정 하도손실량(QCA)과 초기 손실량(PLS) 및 손실 감소계수(QKS)를 고려하여 계산하게 된다.

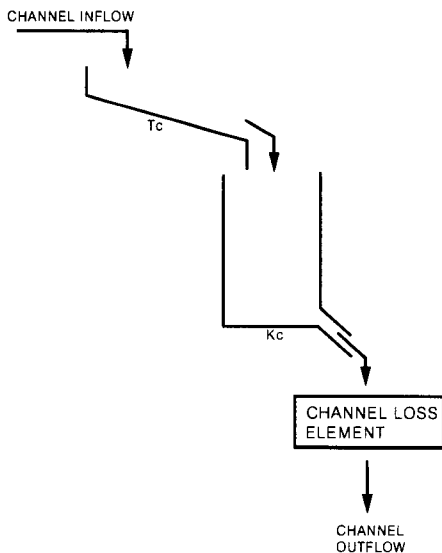


Fig. 2. Procedure used for channel routing.

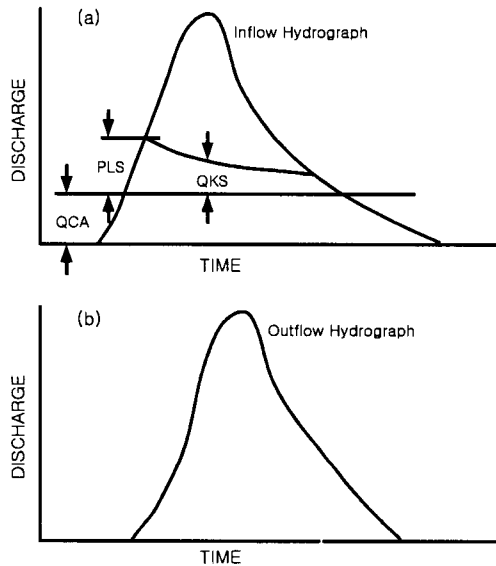


Fig. 3. Subtracting channel losses.

### 3. 연구대상유역의 선정 및 자료수집

본 연구에서는 지형공간특성 자료를 이용한 강우-유출 해석을 위하여 Fig. 4와 같이 금호강 최상류부에 위치한 영천댐 유역을 대상으로 하였으며, 대상유역내의 토지이용도와 토양도는 Fig. 5-6과 같았다. 영천댐 유역의 지형공간자료의 구축을 위해서 영천댐 유역이 포함된 5도엽의 1/25000 수치지도를 기본으로 하여 RiverTools 패키지와 ArcView를 이용하였으며, 강우-유출의 해석을 위한 수문기상학적 자료는 한국수자원공사 영천댐관리사무소의 실측강우량과 유출입량의 자료를 수집해 이용하였다. 다음으로 제작된 수치표고모형을 이용하여 소유역의 분

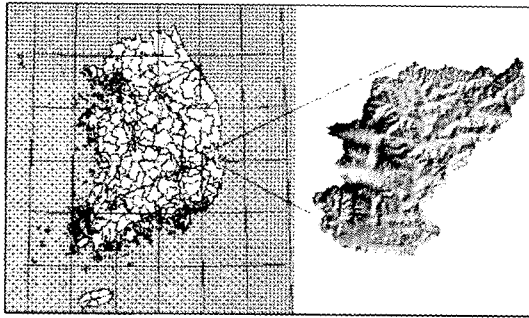


Fig. 4. Location map of study area.

할, 유역의 수계망, 하천의 차수, 유역의 경사, 하도의 경사, 하도의 연장 등 공간자료를 수집하였으며, 그 결과 Table 1과 같았다.

### 4. 강우-유출 모형의 적용 및 분석

본 연구에서 이용된 유출해석모형에 대한 모형매개변수를 추정을 위하여 DEM(수치표고자료)를 이용한 3차원 지형분석 및 정밀토양도에 대한 분석을 실시하였다 또한, 관측 및 예측 유출량의 백분율의 차와 첨두유량의 백분율의 차를 최소화 할 수 있는 모형매개변수를 시행착오법을 이용하여 추정하였다.

연구에 사용된 대상 호우 자료는 한국수자원공사 영천댐관리사무소에서 수집된 1997년에서 1999년 사이의 주요호우사상을 대상으로 하여 유출량의 실측치와 모형에 의한 유출량을 비교한 결과 Table 2 및 Fig. 7과 같이 검토되었다.

Table 2 및 Fig. 7에서 분석·검토된 바와 같이 첨두홍수량은 특이사상을 나타내고있는 1998년 8월 16일의 사상을 제외하고, Clark 모형과 CELLMOD 모형을 이용한 경우에 대하여 각각 -16.2~5.5% 및 -17.9~3.3%의 오차를 나타내고 있으며, 첨두 시간 오차는 Clark 모형과 CELLMOD 모형 각각 0~-1

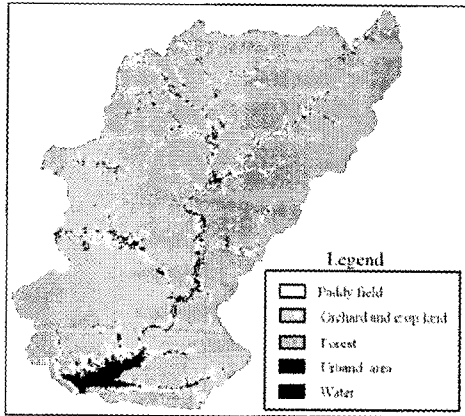


Fig. 5. Land use map.

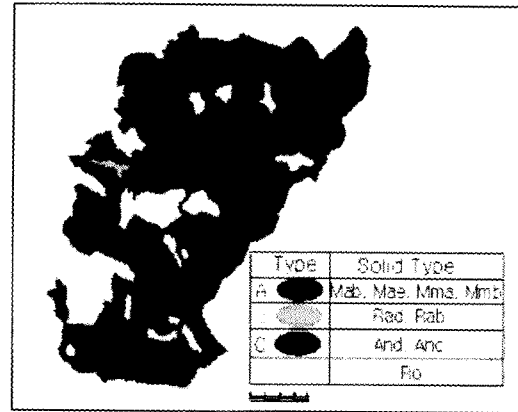


Fig. 6. Soil map.

Table 1. Results of basin characteristics data

NO	Basin							Channel		
	Area (km <sup>2</sup> )	Perimeta (km)	Length (km)	Length of center(km)	Mean wide	Shape factor	Stream order	surface	main stream	total stream
Basin 1	44.019	33.301	16.075	8.445	2.898	0.190	4	0.363	0.031	0.162
Basin 2	68.170	47.108	14.220	5.560	5.045	0.275	5	0.334	0.039	0.116
Basin 3	123.591	57.409	21.820	11.620	6.326	0.326	5	0.321	0.035	0.102
Total	235.780	81.350	35.240	19.190	7.172	0.219	5	0.331	0.017	0.114

Table 2. Comparison of Peak Discharge and Peak Time

storm	method	$Q_p$		$t_p$ (hrs)	
		m/s	R.E.(%)	hrs	R.E.(hr)
1997. 7. 15 07:00	observed	227.1	.	7.16. 16:00	.
	Clark	222.8	- 1.9	7.16. 16:00	0
	CELLMOD	234.6	3.3	7.16. 16:00	0
1997. 8. 04 07:00	observed	200.4	.	8. 5. 04:00	.
	Clark	152.5	5.5	8. 5. 00:00	-4
	CELLMOD	118.6	-17.9	8. 5. 00:00	-4
1998. 7. 25 10:00	observed	181.0	.	7.27. 01:00	.
	Clark	78.7	-8.5	7.27. 01:00	0
	CELLMOD	77.9	-9.4	7.27. 00:00	-1
1998. 8. 01 00:00	observed	223.3	.	8. 1. 13:00	.
	Clark	210.8	-5.6	8. 1. 13:00	0
	CELLMOD	229.6	2.8	8. 1. 12:00	-1
1998. 8. 16 00:00	observed	564.0	.	8.16. 14:00	.
	Clark	408.1	-27.6	8.16. 22:00	8
	CELLMOD	248.5	-55.9	8.16. 20:00	6
1999. 8. 02 18:00	observed	167.5	.	8. 4. 16:00	.
	Clark	158.0	-5.7	8. 4. 15:30	-0.5
	CELLMOD	143.5	-14.3	8. 4. 14:00	-2
1999. 9. 20 00:00	observed	348.8	.	9.20. 12:00	.
	Clark	292.3	-16.2	9.20. 12:00	0
	CELLMOD	319.6	-8.4	9.20. 12:00	0

note) R.E. : Relative error

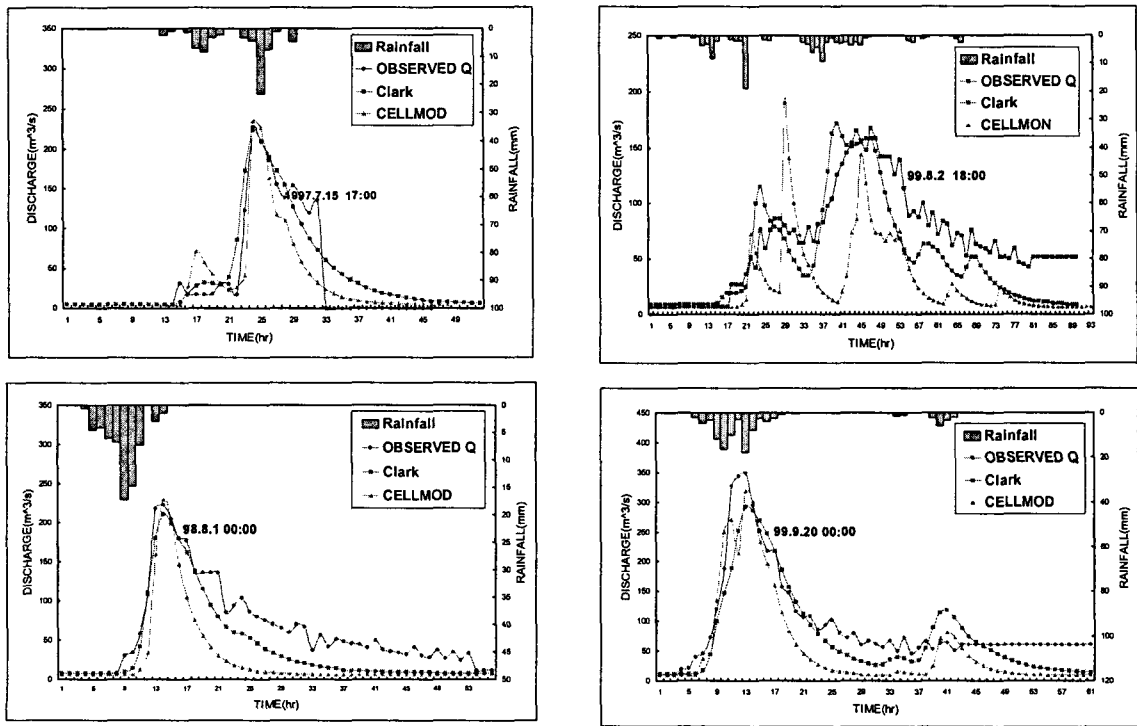


Fig. 7. Comparison of Computed and Observed Hydrograph.

Table 3. Comparison of Statical Analysis between the Observation and Prediction Discharge

Storm	CELLMOD Model					Clark Model				
	ME	MSE	Bias	VER	QER	ME	MSE	Bias	VER	QER
97.7.15 07:00	0.863	41.725	19.968	36.993	3.3	0.837	25.468	6.532	12.101	-1.9
97.8.04 07:00	0.668	27.130	1.768	4.923	-17.9	0.768	30.598	-12.842	35.751	5.5
98.7.25 10:00	0.811	62.114	39.664	67.736	-9.4	0.701	53.023	36.686	62.649	-8.5
98.8.01 00:00	0.803	52.713	41.578	59.790	2.8	0.841	41.600	24.540	35.289	-5.6
98.8.16 00:00	0.628	171.124	110.832	59.883	-55.9	0.711	98.457	58.280	31.489	-27.6
99.8.02 18:00	0.929	62.434	36.855	54.349	-14.3	0.613	27.961	13.129	19.362	-5.7
99.9.20 00:00	0.900	55.595	37.485	39.956	-8.4	0.874	73.501	17.367	18.511	-16.2

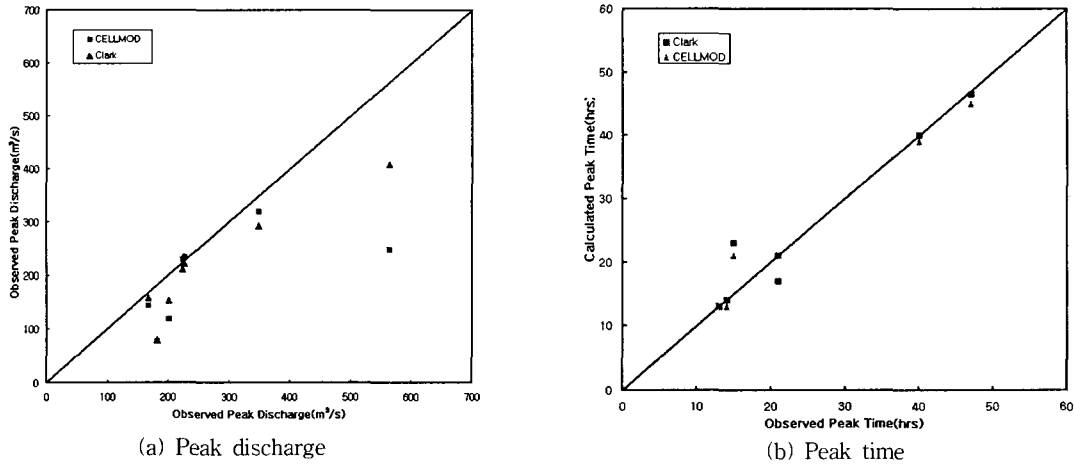


Fig. 8. The Relationship between Observed and calculated runoff characteristics.

시간, -1~2시간으로 나타나고 있어 첨두 발생시간은 거의 같은 것으로 검토되었다.

또한, 본 연구에서 해석된 강우-유출해석 결과를 기존에 하천유역의 유출해석에 많이 이용되고 있는 Clark 모형에 의한 추정결과와 비교 검토하였으며, 유출량 추정치에 대한 적합성을 검토하기 위하여 모델의 효율도(Model Efficient : ME), 절대오차의 평균 제곱근오차(Root Mean Square Error : RMSE), 상대오차의 평균을 나타내는 편기율(Bias), 체적오차의 백분율(Volume Error : VER) 및 첨두 유량차의 백분율(Peak-flow Error : QER)을 사용하였다. 분석 결과 Table 3에서 나타낸 바와 같이 수문곡선의 전체적인 적합성 검토에 사용된 적합성 검토 중에서 모형의 효율도를 나타내는 ME에 있어서 CELLMOD 모형은 0.628~0.863, Clark 모형은 0.613~0.841를 나타내고 있다. ME 값에서 나타낸 바와 같이 각 강우-유출 모형 중에서 CELLMOD형이 실측치에 더욱 근접된 결과를 보여주고 있다.

이상의 검토 결과로 볼 때 강우-유출해석시에 CELLMOD 모형을 이용할 경우 기존에 사용되던

Clark 모형에 비해 홍수 첨두 시각이 빨리 발생하고, 수문곡선이 첨예하게 나타나고 있는 것으로 검토되었다. 대체적으로 높은 정도를 나타내고 있는 것으로 검토되었으나, 좀더 신뢰성있는 분석을 위해서는 장기간의 호우사상을 대상으로 분석, 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

또한, 홍수발생시 자연하천유역에서 첨두홍수와 첨두홍수발생시각은 매우 중요한 사항이므로 이들 추정치에 대한 관측치와의 상관관계를 검토한 결과 Fig. 8과 같았다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 하천유역의 공간특성자료를 이용한 유출해석을 위하여 강우-유출 모형에서 총괄적 모형이 가지는 단점을 보완하여 발전시킨 분포형 모형인 CELLMOD 모형을 이용하여 주요호우시 유출해석을 실시함으로써 모형의 적용가능성을 제안하고자 하였다.

연구대상유역은 금호강 상류에 위치한 영천댐유역을 대상으로 하여 주요호우시 강우-유출량 관측

자료와 DEM자료를 이용한 공간특성자료 추출결과를 이용하여 모형 매개변수를 추출하였다. 계산된 유출량을 관측치와 자연하천유역의 유출해석에 일반적으로 널리 이용되고 있는 총괄형 모형인 Clark 모형의 해석결과와 비교 검토함으로써 CELLMOD 모형의 적용성을 검토하였다.

분포형 모형인 CELLMOD 모형을 이용하여 강우-유출을 해석한 결과 유출수문곡선의 첨두유량은 계산치가 관측치보다 다소 과소하게 추정되었음을 알 수 있었으며, 첨두발생시간은 관측치와 비교해 볼 때 Clark 모형보다 조금 빨라지고 있으나 전체적으로 볼 때 거의 동시에 발생한 것으로 나타났다.

본 연구에서 제안된 모형을 이용하여 분석한 결과 강우-유출과정의 물리적 불확실성을 감소시킴으로서 하천유출예측에 양호한 결과를 얻을 수 있었으며, 하천유역의 강우-유출해석의 알고리즘으로서 적합하다고 사료된다.

정도 있는 결론의 도출을 위한 향후 연구과제로서 CELLMOD모형을 적용할 때 호우사상을 보완하여 적용시키며, 소유역을 좀더 세분화해서 분석할 필요가 있다고 사료된다. 또한, 비교적 관측자료가 충분한 유역을 대상으로 분석하며, 모형 매개변수와 유역특성(하도특성) 인자간의 상관관계 규명할 필요가 있다고 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) US Army Corps of Engineers, 1990, The Hydrologic Engineering Center, HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual, 1-190pp.
- 2) Sugawara, M., 1979, Automatic Calibration of the Tank Model, Hydrological Science Bulletin, 24(3), 375-388.
- 3) Sugawara, M., I. Watanabe, E. Qzaki and Y. Katsuyama, 1984, Tank Model with Snow Component, Research Notes No.65, National Research Center for Disaster Prevention, Japan, 1-293pp.
- 4) U. S. Army Engineer Division, North Pacific, 1972, Program Description and User Manual for SSARR, Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation, 1-70pp.
- 5) U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 1995, 2000, Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, Version 2.0, 1-188pp.
- 6) Brigham Young University, Environmental Modeling Research Laboratory, 1999, WMS (Watershed Modeling System) User's Manual, Utah, I-1-XVII-13.
- 7) 이용수, 1989, SSARR 모형에 의한 유역유출 해석, 충북대학교 대학원 석사학위논문, 1-33pp.
- 8) 김종훈, 1997, HEC-1 모형의 대하천유역에의 적용, 대한토목학회지, 17II(1), 1-11.
- 9) Abbott, M. B., J. C., Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell and J. Rasmussen, 1986, An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, 'SHE'-1: History and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modelling System, J. Hydrol., 87, 45-59.
- 10) Abbott, M. B., 1986, An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, 'SHE'-2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System, J. Hydrol., 87, 61-77.
- 11) Huber, W. C., J. P. Heany, M. A. Medina, W. A. Peltz, H. Sheikh and G. F. Smith, 1988, SWMM (Storm Water Management Model) User's Manual Version IV, EPA-600/2-84-109a, Environmental Protection Agency, Athens, Gainesville, 1-569pp.
- 12) Diskin, M. H. and E. S. Simpson, 1978, A Quasi-linear Apatially Distributed Cell Model for the Surface Runoff System, Water Resour. Bull., 14(4), 903-918.
- 13) Arnon, K., 1988, Storm Runoff Forecasting Model Incorporating Spatial Data, Ph.D. Dissertation, The University of Arizona, 1-249pp.
- 14) 이증석, 안승섭, 조명희, 1995, 하천유역의 유역 특성인자 분석을 위한 위성영상과 GIS의 응용에 관한 연구, 대한토목학회 95년도 학술발표회 논문집(III), 149-152pp.
- 15) 이증석, 안승섭, 조현경, 도준현, 김승균, 2002, 지형공간 특성자료를 이용한 강우-유출해석, 한국환경과학회 가을학술발표회 발표논문집, 11(2), 123-126.
- 16) 임민수, 1988, 분포형 유출모형을 이용한 홍수예경보 시스템, 울산대학교 대학원 석사학위논문, 1-53pp.