

임진강 유역의 홍수기 강우-유출모형 적용 및 레이더강우 자료의 활용방안

Application of Rainfall-Runoff Models and Provision of Radar Rainfall Data during Flood in Imjin River Basin

김 성 준* 박 노 혁** 맹 승 진**
Kim, Seong-joon Park, Roh-hyuk Maeng, Sung-jin

Abstract

The purpose of this study is to evaluate storm runoff models of Imjin river basin(8,117.5km²) for the provision of radar rainfall situation. Two lumped models, Storage Function Model(SFM) and HEC-1 model which are now in use broadly and proved to be highly applicable in many watersheds of Korea, were evaluated. These models were successfully tested for the Yeoncheondam watershed(1,838.3km²) by using two big storm events of 1990 and 1996. For further evaluation, it is recommended that the hydrologic data, basically for hourly-based discharge should be collected in the selected key stations along the main stream. In addition, the method to incorporate the radar-detected rainfall information as a model input was suggested.

I. 서론

1996년 7월 26일부터 7월 28일까지 3일 동안 내린 경기, 강원 북부지방의 집중호우는 임진강 유역에 엄청난 홍수를 가져왔다. 이 집중호우로 철원, 연천, 적성 지역에서는 하루에 400mm 이상, 3일 동안 700mm 이상의 비가 쏟아져 무려 최대 500년 빈도의 강우기록을 남겼다. 이는 1995년 중부지방 대홍수시의 일최대 강우량 362mm

를 훨씬 초과한 것이었다. 이로 인한 인명손실은 총 89명에 이재민도 10,963세대에 80,631명이 발생하였으며, 재산피해는 5,313억원으로 집계되었다.

이 홍수의 특징은 1953년 휴전 후 국토개발 면에서 상대적으로 부진한 휴전선 지역에 호우가 집중되어 그 피해가 더 컸다는 점이다. 그 동안 임진강 유역은 2/3가 이북에 위치하고 있고 나머지 유역도 대부분 군사보호지역으로 되어 있어 홍수조절용 댐의 건설

* 건국대학교 농업생명과학대학
** 한국수자원공사 수자원연구소

키워드 : 강우-유출모형, 임진강, 홍수, 레이더 강우 자료

은 물론 홍수예경보 체계 구축을 위한 수문 정보를 제대로 얻을 수 없음과 동시에 홍수기 유출모형에 의한 연구가 미흡하였기 때문에 이들 지역에 대한 홍수 피해가 막대하였던 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 임진강 유역(8,117.5 km²)내의 연천댐 지점을 제외하고는 타지점의 시단위 유출자료가 거의 없는 상태여서 연천댐 유역(1,838.3km²)을 대상으로 모형의 적용성을 검토하되, 조류의 영향이 없는 적성지점(6,834.3km²)까지는 유출을 모의 발생시킬 수 있도록 모형을 구성하였다.

선정된 모형은 우리 나라에서 널리 쓰이고 있는 저류함수모형과 HEC-1 모형이며, 검토 자료는 과거('90년, '96년)의 홍수사상 자료를 이용하였다. 아울러 동 유역에 대한 수문자료 축적 및 향후 홍수예경보 체계 구축의 일환으로 강우관측용 레이더의 설치가 검토되고 있어, 레이더 강우관측 자료를 유출 모형의 입력 자료로 받아들이는 방법을 제시하였다.

II. 모형의 이론

1. 저류함수 모형

저류함수모형에서는 홍수 유출을 Manning의 경험식을 따르는 지표류라 가정하고, 유역 또는 하도의 구간별 저류량 S_t (m³)을 식 (1)에 의해 계산한다.

$$S_t = KQ_t^p \quad (1)$$

여기서 K 는 유역과 하도의 저류 상수이고, p 는 유역과 하도의 상수이며, Q_t (m³/s)은

직접 유출을 나타내고 있다.

식 (1)의 운동방정식을 식 (2) 또는 식 (3)의 연속방정식과 조합하여 유역 및 하도의 유출을 산정한다.

$$\frac{1}{3.6} f \bar{r} A - Q_t = \frac{dS_t}{dt} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n f_i I_i - Q_t = \frac{dS_t}{dt} \quad (3)$$

여기서 f 및 f_i 는 유역 및 하도에서의 유출 계수, \bar{r} 는 유역평균 시간우량 (mm/hr), A 는 유역면적(km²)을 나타내며, I_i 는 하도 구간 상류 지점에서의 유입량(m³/s)을 나타낸다.

식 (1)의 상수 K , p 는 과거 홍수자료로부터 쉽게 구할 수 있으며, 매 강우사상에 대해 유역 평균강우량 \bar{r} 과 이로부터 유역유출 과정의 모의를 통해 계산된 하도 유입량 I 로부터 식 (1)~(3)에 의해 홍수유출량 Q (m³/s)를 산정할 수 있다.

이외에도 저류함수 모형의 운영을 위해서는 강우초기의 유출을, 즉 1차 유출율로 표현되는 f_1 , 유효강우량 산정에 필요한 포화 유출율 f_{sa} 및 포화우량 R_{sa} 에 대한 초기가정이 요구된다.

2. HEC-1 모형

모형의 각 유출 과정별로 설정되어 있는 계산방법의 종류와 임진강 유역에 적용하기 위해 선정된 계산방법은 <Table 1>과 같고, 본 연구에서 선정한 각 과정별 적용방법의 기본이론을 요약하면 다음과 같다.

<Table 1> Adopted methods in HEC-1 Model for this study

Process	Rainfall	Interception/ infiltration	Surface runoff	Channel infiltration	Channel routing	Reservoir routing
Adopted in this study	Input rainfall hyetograph	SCS Curve number	Clark unit hydrograph	-	Muskingum- cunge	Modified puls

가. 손실률 계산(SCS Curve Number Method)

HEC-1에서 사용하고 있는 손실률 계산방법은 Initial & Uniform Loss Rate, Exponential Loss Rate, SCS Curve Number, Holtan Loss Rate 등이 있으나 이들 중에서도 유출량 자료 등이 부족하여도 적용이 가능한 SCS Runoff Curve Number Method를 사용하였다.

손실우량은 유출곡선지수(CN)와 강우의 초기손실(IA)의 관계로 계산되고, CN과 IA는 다음의 식 (4), 식 (5) 및 식 (6)과 같이 유효우량과 관련하여 나타낼 수 있다.

$$ACEXS = \frac{(ACRAIN - IA)^2}{ACRAIN - IA + S} \quad (4)$$

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (5)$$

$$IA = 0.2 S \quad (6)$$

여기서 ACEXS, ACRAIN 및 S는 각각 유효우량(mm), 호우별 총우량(mm) 및 유역의 최대 잠재보유수량(mm)이다. 이 방법의 적용에서 가장 중요한 것이 CN값의 결정인데, CN값은 토양의 형태(Soil type)와 토지이용상태 및 선행토양함수조건(AMC, Antecedent Moisture Condition)에 따

라 결정된다.

나. 합성단위도 유도방법(Clark Unit Hydrograph)

Clark 방법에 의해 단위도를 구하기 위해서는 세가지 매개변수가 필요하며, 세가지 매개변수로는 도달시간(Tc), 저류상수(R) 및 등유하시간별 누가면적(Time-area)이다. HEC-1 모형에서는 등유하시간별 누가면적자료가 주어지지 않는다면 식 (7) 및 식 (8)에 의해 자체적으로 계산된다.

$$AI = 1.4114 T^{1.5} \quad 0 \leq T < 0.5 \quad (7)$$

$$AI = 1 + 1.4114 (1 - T)^{1.5} \quad 0.5 < T < 1 \quad (8)$$

여기서 AI는 등유하시간곡선에 의한 소유역별 누가면적이고 T는 등유하시간곡선에 의한 소유역별 도달시간이다. 등유하시간별 누가면적곡선의 종거는 단위유효우량에 대하여 유출량으로 계산되어지고, 시간간격에 따라 내삽되며, 전이된 수문곡선은 유역의 저류효과를 고려하기 위해 선형저수지를 통해 추적된다. 선형저수지 추적의 일반식은 다음의 식 (9)와 같다.

$$Q_t = CA \cdot I + CB \cdot Q_{t-1} \quad (9)$$

Routing 상수는 식 (10)~식 (12)에 의해 계산된다.

$$CA = \frac{\Delta t}{R + 0.5 \cdot \Delta t} \quad (10)$$

$$CB = 1 - CA \quad (11)$$

$$QUNGR = 0.5 (Q_{t-1} + Q_t) \quad (12)$$

여기서 R, Δt , I, Q_{t-1} , Q_t 및 QUNGR는 각각 유역저류상수, 계산시간 간격(h), 전이된 수문곡선(유입수문곡선)의 종거, 전시간의 유출량, 해당시간의 유출량 및 해당시간의 단위유량도의 종거이다.

다. 하도 홍수추적(Muskingum-Cunge Routing)

Muskingum-Cunge 방법은 측방유입류의 고려와 상류지점에서 발생한 수문곡선의 하도추적에 사용된다.

이 방법은 모형에 사용되는 변수 값들이 하도에서 발생하는 물리현상에 기초하고 있으며, 많은 경우의 흐름상황에 대해서 완전한 부정류 방정식의 해와 비교해서 좋은 결과를 보여준 바 있다. 또한 계산되어진 해가 계산시간 간격에 독립적인 점이 장점이라 할 수 있는 반면 흐름의 배수효과를 고려할 수 없고, 매우 평탄한 경사에서 빠르게 증가하는 수문곡선의 추적시 완전한 부정류 방정식의 해에 수렴한다는 단점이 있다.

기본 수식화는 다음의 식 (13) 및 식 (14)와 같이 연속방정식과 운동량 방정식의 확산식으로부터 유도된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (13)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial Y}{\partial x} \quad (14)$$

상기의 식 (13)과 식 (14)를 정리하면 다음의 이송 확산식이 만들어진다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + cq_L \quad (15)$$

여기서 Q는 유량(m^3/s), A는 유수 단면적(m^2), t는 시간(s), Y는 수심(m), q_L 은 하도의 단위 길이당 측방유입량($m^3/s/m$), S_f 는 에너지 경사, S_0 는 하상경사, C는 표면파의 전파속도이며 μ 는 수리확산계수이다. 상기의 식에서 표면파의 전파속도 c와 수리확산계수 μ 는 식 (16) 및 식(17)과 같이 정의된다.

$$c = \frac{dQ}{dt} \Big|_x \quad (16)$$

$$\mu = \frac{Q}{2BS_0} \quad (17)$$

여기서 B는 수면폭이다. 위의 미분방정식을 유한차분법에 의해 해석한다. 하도구간에서의 저류량은 다음의 Muskingum 방법으로 가정된다.

$$S = K \cdot [X \cdot I + (1-X)O] \quad (18)$$

여기서 S는 하도의 저류량, K는 저류상수, X는 가중계수이다.

라. 저수지 홍수추적(Modified-Puls Routing)

Modified-Puls 방법은 유입량이 여수도와 같이 일정구간을 통하여 유출하는 경우에 잘 적용된다. 저수지 수위가 수평으로 유지되며 유출량은 저수지 저류량의 단일 함수라

는 가정을 바탕으로 다음 연속방정식의 연속 해로 홍수추적을 실시한다.

$$\frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{S_1 - S_2}{\Delta t} \quad (19)$$

$$\frac{S_2}{\Delta t} + \frac{O_2}{2} = \left(\frac{S_1}{\Delta t} + \frac{O_1}{2} \right) - O_1 + \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (20)$$

III. 모형의 적용

1. 유역개요

가. 유역특성

임진강 유역은 총 12개의 주요 지천유역과 임진강 전체유역 및 임진강 유역을 상류부와 하류부 2개 유역으로 분리하여 총 15개 유역에 대한 유역특성을 나타낸 결과는 <Table 2>와 같다.

나. 소유역 및 하도분할

한국수자원공사가 1995년 수행한 '임진강 유역조사(1차) 보고서'에서 제시한 소유역별 면적 및 하도의 길이를 참조하여, 임진강 유역을 크게 연천댐 유역과 연천댐을 제외한 나머지 유역으로 구분하여 연천댐 상류 유역은 6개의 소유역과 5개의 하도로 구분하였고, 나머지 유역은 15개의 소유역과 15개의 하도로 분할하였다.

연천댐에서의 방류량은 임진강 유역으로의 유입량으로 하여 유출계산이 가능하도록 하였다. 임진강 유역에 대한 소유역 및 하도 분할도는 <Fig. 1>과 같으며, 이에 따른 연천댐 유역과 임진강 유역전체의 유출 모식도는 각각 <Fig. 2> 및 <Fig. 3>과 같다.

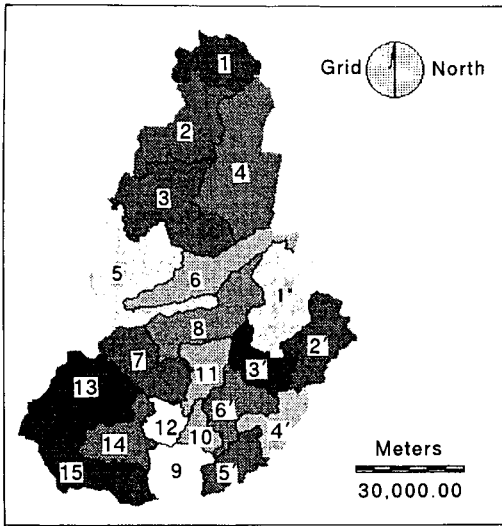
2. 입력자료

가. 저류함수모형

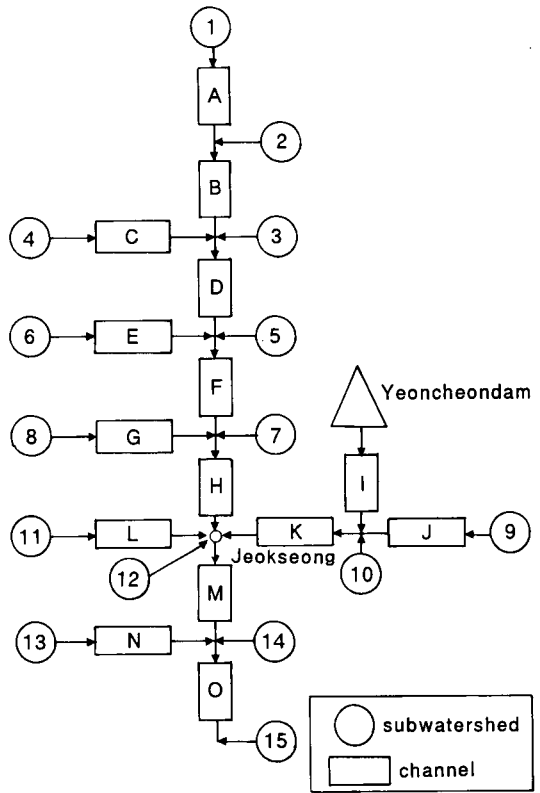
저류함수모형에 의한 홍수 유출 해석시 적용되는 매개변수, 즉 저류상수에는 소유역

<Table 2> Sub-watershed characteristics

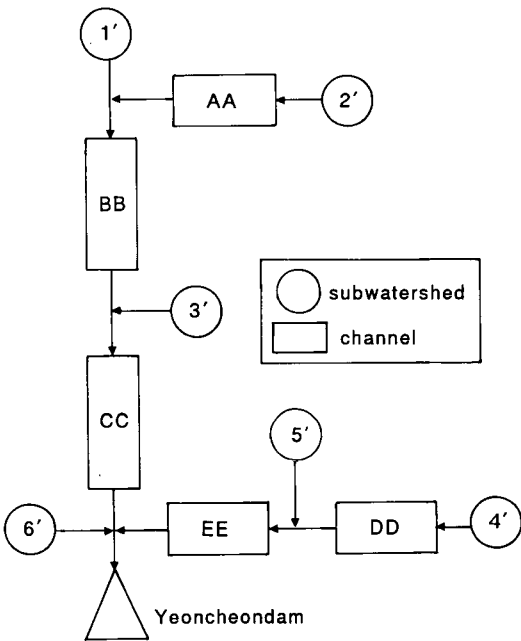
Watershed Name	Area (km ²)	Channel length (km)	Ave. slope	Ave. width(km)	Bifurcation ratio
Gomitan-cheon	1055.1	113.7	0.2605	9.3	0.0816
Pyungan-cheon	400.7	69.4	0.2050	5.8	0.0832
Yeukgok-cheon	481.5	75.5	0.1001	6.4	0.0845
Kimhwanamdae-cheon	414.4	39.7	0.1997	10.4	0.2629
Pochun-cheon	239.5	30.5	0.1374	7.9	0.2575
Youngpyung-cheon	565.7	40.6	0.1683	13.9	0.3439
Shin-cheon	339.3	37.5	0.1417	9.0	0.2443
Chatan-cheon	186.8	36.8	0.1977	5.1	0.1379
Hantan-river	2436.4	133.4	0.1671	18.3	0.1369
Sami-cheon	462.2	47.5	0.1285	9.7	0.2049
Munsan-cheon	188.2	30.1	0.1188	6.3	0.2077
Sa-cheon	345.0	29.1	0.0884	11.9	0.4074
Upper Imjin	4269.0	190.2	0.2205	22.4	0.1180
Down Imjin	3848.5	197.8	0.1450	19.5	0.0984
Imjin-river	8117.5	254.6	0.1848	31.9	0.1260



<Fig. 1> Sub-watershed boundary map for model application



<Fig. 3> Flow diagram for model application (Imjin riverbasin)



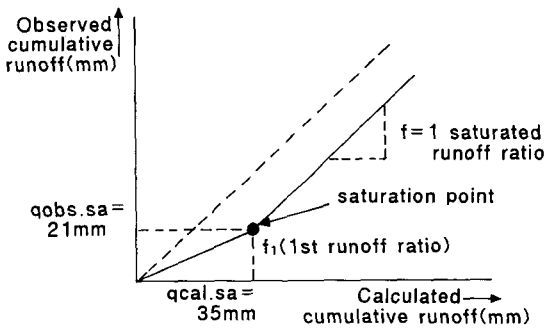
<Fig. 2> Flow diagram for model application (Yeoncheondam watershed)

이들 매개변수의 산정 방법에는 경험적인 방법과 해석적인 방법이 있다. 해석적인 방법을 적용하기 위해서는 신뢰성 있는 과거 강우-유출자료가 필요하나 현재 임진강 유역은 유역의 2/3가 이북지역에 위치하고 있어 정확한 수문자료의 수집이 용이하지 않으며, 이남지역의 경우에도 수문자료가 충분하지 않아 일본 利根川에서 적용된 바 있는 경험식에 의거 필요한 매개변수를 산정하였다. 利根川 유역은 관동지역에 위치하며, 내륙지역에서 발원하여 태평양으로 유입된다. 유역 면적은 약 16,840km²로 관동권 지방의 39%를 차지하고 있으며, 이 유역의 연 평균 강수량은 1,130mm, 연간 유출량은 약 130억m³이다.

1) 1차 유출율(f_1)과 포화우량(R_{sa})

홍수유출 해석시 유효우량 산정은 어려운 작업중의 하나이다. 실제로 강우 손실 현상은 매우 불명확하여 많은 가정 하에 추정하지 않으면 안되며, 또한 강우의 형태, 강우 지속시간, 선행강우조건(토양의 수분상태)에 따라서 유효우량 자체도 일정하지 않다. 본 연구에서는 누가곡선에 의한 방법으로 간략하게 초기값을 산정하고, 이 값들은 실제 적용시 실측 수문곡선을 고려하여 f_1 과 R_{sa} 를 반복 수정, 각 호우조건에 적합한 값을 도출 적용하도록 하고자 한다.

(Fig. 4)에서 1차 유출율 f_1 은 포화점 이전 직선의 기울기와 같고 포화우량 R_{sa} 는 포화점에 해당하는 시간까지의 유역 누계 강우량과 같으므로 즉, 1차 유출율 $f_1 = 21/35$ (포화점의 실측유출고/포화점의 계산유출고) = 0.6, 포화우량 $R_{sa} = 20\text{mm}$ 이다.



<Fig. 4> f_1 and R_{sa} by cumulative curve method

따라서 본 연구에서는 분석된 1차 유출율 및 포화우량을 이용하여 임진강 유역의 각 소유역의 값으로 선정하였다.

2) 분할 소유역의 매개변수 산정

저류함수모형의 유역 저류상수 K , p , T_1 은 기존 수위관측소 유역의 강우-유출관계를

분석하여 추정할 수 있으며, 수문자료가 없거나 자료의 신뢰성이 매우 낮아 상관식 도출이 불가능할 때에는 경험식을 이용하여 저류상수와 지체시간을 추정할 수 있다.

따라서 저류함수 모형을 개발하여 다년간 활용해온 바 있는 일본 하천유역의 홍수에정보에서 얻어진 저류상수 및 지체시간을 추정하는 주요공식에는 利根川식, 角屈식, 木村식 등이 있으나, 본 연구에서는 利根川공식과 함께 한강유역에서의 경험식을 선정하여 매개변수를 산정함으로써 利根川공식과 한강공식의 결과를 비교하여 적절한 매개변수를 선택하여 적용하였다.

利根川 경험공식은 식 (21)~식 (23)과 같으며, 이 식에 의하여 산정한 각 소유역의 K , p , T_1 , f_1 , R_{sa} 값은 (Table 3)과 같다.

$$K = 118.84 \times \left(\frac{1}{L}\right)^{-0.300} \quad (21)$$

$$p = 0.175 \times \left(\frac{1}{L}\right)^{0.235} \quad (22)$$

$$T_1 = 0.056 \times L - 0.031 \quad (23)$$

여기서 L = 유역의 최장 유로장(km), I = 유역 평균경사(무차원)이다. 한편으로 한강유역의 30개 분할 소유역에 대한 상관관계로부터 구한 한강공식(한강수계 유출프로그램 개선방안, 건설부 한강홍수통제소, 1991)은 식 (24)~식 (26)과 같으며, 이 식에 의하여 산정한 각 소유역의 K , p , T_1 , f_1 , R_{sa} 값도 (Table 3)에서 볼 수 있다.

$$K = 171.831 \times \left(\frac{1}{I}\right)^{-0.356} \quad (24)$$

$$p = 0.0825 \times \left(\frac{1}{T}\right)^{0.385} \quad (25)$$

$$T_l = 0.0492 \times L - 1.814 \quad (26)$$

(Table 3)에서 보는 바와 같이 각 소유역에 대한 K , p , T_l 값을 비교해 보면 K 값은 利根川식에 비하여 한강식의 결과가 대체적으로 약간씩 크고, P 값은 반대로 한강식에 비하여 利根川식의 결과가 약간씩 큼을

알 수 있었다.

그러나 지체시간 T_l 값의 경우 한강식의 결과는 대다수의 소유역에서 영보다 작게 산정되었다. 비록 “한강수계 유출프로그램 개선 방안” 보고서에서는 지체시간이 음의 값으로산정된 소유역에서는 利根川식에 의한 지체시간을 활용할 것을 제안하였으나, 지금과 같이 21개 소유역중 12개 이상의 소유역에서 지체시간이 영보다 작은 값을 보이는 경우에는 한강식의 적용은 무리가 따른다고 판단되어 본

<Table 3> Sub-watershed characteristics and coefficients for Storage Function Model

No.	Watershed name	Characteristics			Sub-watershed coefficients								Remarks
		Area (km ²)	Length (km)	Ave. slope(L)	by Yigeun-cheon			by Han river			f ₁	Rsa	
					K	P	T _l	K	P	T _l			
1	Beobdeung	338.0	22.592	0.05418	49.558	0.347	0.833	60.862	0.252	-0.707	0.6	20	Imjin river basin
2	Pangyo	489.0	23.896	0.02745	40.413	0.407	0.899	47.777	0.327	-0.643	0.6	20	
3	Hupyung	810.0	70.022	0.01872	36.029	0.446	3.233	41.691	0.379	1.617	0.6	20	
4	Icheon	681.0	47.052	0.01339	32.583	0.482	2.071	37.003	0.432	0.492	0.6	20	
5	Pyungan-cheon	396.1	62.562	0.01518	33.833	0.468	2.856	38.693	0.411	1.252	0.6	20	
6	Namsandong	794.1	57.520	0.00814	28.064	0.542	2.601	30.994	0.523	1.004	0.6	20	
7	Yukgok-cheon	456.6	73.016	0.00885	28.777	0.532	3.385	31.931	0.506	1.764	0.6	20	
8	Gunnam	393.1	42.717	0.00829	28.218	0.540	1.851	31.197	0.519	0.279	0.6	20	
9	Dongdu-cheon	254.5	29.994	0.03167	42.185	0.394	1.208	50.273	0.310	-0.344	0.6	20	
10	Jeongok	60.1	10.996	0.03065	41.773	0.397	0.246	49.690	0.314	-1.275	0.6	20	
11	Chatan-cheon	179.5	29.860	0.02662	40.043	0.410	1.201	47.258	0.331	-0.351	0.6	20	
12	Jeokseong	144.0	22.733	0.00572	25.245	0.589	0.840	27.336	0.599	-0.700	0.6	20	
13	Sami-cheon	404.6	39.812	0.01552	34.059	0.466	1.704	38.999	0.408	0.137	0.6	20	
14	Imjingak	250.0	38.276	0.00306	20.926	0.683	1.627	21.879	0.762	0.062	0.6	20	
15	river mouth	628.6	33.941	0.00427	23.125	0.631	1.407	24.634	0.670	-0.151	0.6	20	
1'	Kimhwa	352.6	32.895	0.02873	40.970	0.403	1.354	48.559	0.322	-0.202	0.6	20	Yeon-cheon-dam watershed
2'	Hantan river	450.7	64.920	0.00622	27.568	0.550	2.355	30.345	0.535	0.766	0.6	20	
3'	Kwanin	341.2	29.183	0.01103	30.742	0.505	1.167	34.535	0.465	-0.381	0.6	20	
4'	Pocheon-cheon	179.5	26.717	0.03247	40.016	0.395	1.042	50.034	0.311	-0.505	0.6	20	
5'	Youngjung	219.8	26.229	0.04003	45.256	0.373	1.017	54.645	0.283	-0.529	0.6	20	
6'	Yeoncheondam	294.5	27.914	0.01372	32.822	0.479	1.102	37.325	0.427	-0.446	0.6	20	

임진강유역에서의 소유역별 저류상수의 적용은 利根川 경험공식으로 결정하였다.

$$K_s = 0.105 \times L \times W_d^{0.4} \times \left(\frac{1}{I}\right)^{0.3} \times n^{0.6} \quad (29)$$

3) 분할 하도의 매개변수 산정

하도상수에 대한 산정 역시 利根川과 한강 경험식을 비교하여 적정한 방법을 결정하였다. 그러나 “한강수계 유출프로그램 개선방안” 보고서에서는 한강 유역의 23개 분할 하도구간에 대한 저류상수 K' , p' , T_1 의 산정 기준으로 지체시간 T_1 은 利根川 공식으로 산정하고, 측량성과가 있는 구간에서는 利根川 공식에 의한 T_1 과 이근천 조도계수 추정식을 이용하여 저류상수 K' , p' 를 산정하고, K'/L 과 유역평균경사 i 의 상관분석을 실시하도록 하였다.

- L : 하도연장(km)
- I : 하도의 평균경사(무차원)
- W_d : 하도의 평균폭(m)
- n : Manning의 조도계수

일본 利根川 : $n = 0.1 - 0.02 \times \log\left(\frac{1}{I}\right)$ (30)

한국 한강:

$$n = 0.04773 - 3.8124 \times 10^{-6} \times \left(\frac{1}{I}\right) \quad (31)$$

측량성과가 없는 구간에서는 측량성과가 있는 구간에서 산정한 p' 의 평균치를 채택하고, 저류상수 K' 는 K'/L 과 i 의 상관관계식을 이용하여 산정하도록 하였다.

$$T_1' = 0.00165 \times L \times I^{(-0.5)} \quad (32)$$

먼저 하도의 저류상수 p' 를 산정해 보면 하도구간을 등류수로 가정하여 하천단면을 장방형, 포물선형, 삼각형으로 단순화하여 Manning 공식과 Chezy 공식을 사용하여 결정할 수 있으나, 본 연구에서는 하천단면을 장방형으로 가정하여 Manning공식에 의한 p' 값을 적용하기로 하였다.

식 (29)에 利根川 조도계수 식 (30)과 한강 조도계수 식(31)을 각각 적용하여 K' 를 구할 수도 있다. 한강 공식에 의한 저류상수 K' 의 추정은 식 (33)과 같으며, 산정 결과는 <Table 4>와 같다.

$$p' = 0.6 \quad (27)$$

$$K' = 0.096 \times L \times i^{-0.606} \quad (33)$$

利根川 공식에 의한 저류상수 K' 와 T_1 의 추정은 식 (28)~식 (32)와 같으며, 산정 결과는 <Table 4>와 같다.

여기서 i : 유역평균경사.

$$K' = 1.67 \times K_s \quad (28)$$

그러나 식 (33)은 ‘한강수계 유출프로그램 개선방안’ 보고서에서 회귀분석에 사용된 자료의 부족에 따른 신뢰성의 한계를 갖고 있음을 밝힌 바 있다.

여기서

<Table 4>에서 보는 바와 같이 하도구간에 대한 조도계수 n 과 저류모형 계수값을 비교해 보면, 조도계수 n 은 利根川식에 비하여 한강식의 결과가 조금 크며, K' 의 경우

<Table 4> Channel characteristics and coefficients for Storage Function Model

No.	Channel characteristics						Channel coefficients					Remarks
	Start - End	Length (km)	Ave. width (m)	Ave. slope	Roughness coefficient(n)		by Yigeun-cheon				by Han river	
					by Yigeun-cheon ^㉔	by Han river ^㉕	K' (by ㉔)	K' (by ㉕)	P'	T _r '	K'	
A	Beobdeung-Pangyo	28.853	200	0.00388	0.05178	0.04675	66.424	62.474	0.6	0.764	80.0996	
B	Pangyo-Icheon	40.472	350	0.00215	0.04665	0.04596	130.690	129.523	0.6	1.440	160.682	
C	Hupyung-Icheon	38.106	500	0.00294	0.04937	0.04643	133.668	128.844	0.6	1.160	125.154	
D	Icheon-Namsandong	56.846	550	0.00148	0.04340	0.04515	235.603	241.253	0.6	2.438	283.004	
E	Pyungan-Namsandong	17.258	600	0.00133	0.04248	0.04486	75.488	78.005	0.6	0.781	91.666	
F	Namsandong-Gunnam	40.118	650	0.00057	0.03512	0.04104	208.422	228.857	0.6	2.773	356.082	
G	Yukgokcheon-Gunnam	29.820	800	0.00131	0.04235	0.04482	146.735	151.821	0.6	1.359	159.850	Imjin
H	Gunnam-Jeokseong	18.204	800	0.00071	0.03703	0.04236	99.314	107.669	0.6	1.127	141.441	river
I	Yeoncheondam-Jeongok	10.630	550	0.00113	0.04106	0.04436	46.207	48.397	0.6	0.522	62.322	basin
J	Dongducheon-Jeongok	8.009	250	0.00262	0.04837	0.04628	21.771	21.201	0.6	0.258	28.207	
K	Jeongok-Jeokseong	19.363	600	0.00067	0.03652	0.04204	95.023	103.394	0.6	1.234	155.827	
L	Chatancheon-Jeokseong	20.742	700	0.00116	0.04129	0.04444	98.842	103.306	0.6	1.005	119.691	
M	Jeokseong-Imjingak	29.778	900	0.00010	0.02000	0.00961	211.884	136.450	0.6	4.913	758.869	
N	Samicheon-Imjingak	29.128	900	0.00024	0.02760	0.03185	193.383	210.696	0.6	3.102	436.691	
O	Imjingak-river mouth	17.737	1200	0.00017	0.02461	0.02530	136.761	139.066	0.6	2.245	327.717	
AA	Kimhwa-Hantan river	5.730	250	0.00087	0.03879	0.04335	18.993	20.302	0.6	1.127	39.362	Yeonch-
BB	Hantan river-Kwanin	28.247	300	0.00294	0.04937	0.04643	80.773	77.858	0.6	0.321	92.774	eondam
CC	Kwanin-Yeoncheondam	20.241	300	0.00356	0.05103	0.04666	55.747	52.832	0.6	0.860	59.200	water-
DD	Pocheon-Youngjung	3.907	300	0.00128	0.04214	0.04475	13.039	13.518	0.6	0.560	21.240	shed
EE	Youngjung-Yeoncheon	10.996	350	0.00264	0.04843	0.04629	34.147	33.231	0.6	0.180	39.550	

利根川식에 비하여 한강식의 결과가 약간 큰 값을 보여주고 있다. '한강수계 유출프로그램 개선방안' 보고서에서 이근천 경험공식이 제안된 바 있으므로 소유역의 저류상수와 마찬가지로 하도에 대한 저류상수는 이근천 경험공식으로 적용하기로 결정하였다.

나. HEC-1 모형

1) 강우 자료

강우의 입력은 사용자 입력 모드를 사용하였고 사용된 강우량 자료는 임진강 유역에 발생한 '90.9.10~9.14과 '96.7.26~7.28 사이의 시간 강우량을 적용하였다. HEC-1 모형에 의한 연천댐 지점의 유입량을 산정하기 위해 '90.9.10~9.14은 유역내의 현존관측소인 포천 및 동송 지점에서의 시간별 강우량 자료를 획득하여 사용하였고 '96.7.26~7.28은 연천, 적성, 포천 및 철원 지점에서

<Table 5> Storm events used in this study

Storm event	Date	Rainfall duration (h)	Max. rainfall intensity (mm/h)	Rainfall amount (mm)	Max. discharge (m ³ /s)
case 1	Sept. 10, '90	35	21.9	271.7	3,439*
case 2	July 26, '96	57	34.6	641.5	-

* Yeoncheondam watershed

의 시간별 강우량 자료를 획득하여 사용하였다(〈Table 5〉).

그러나 동일 호우사상기간 북한지역에 포함된 소유역의 강우량 자료는 획득하지 못하였기 때문에 해당 소유역에서 가까운 남한 지역의 강우량 자료를 사용하였다.

2) 소유역 자료

소유역에 대한 유출량 산정을 위해 필요한 유효 강우량은 SCS 유출곡선지수법을 사용하여 구하였으며, SCS방법을 적용하기 위한 유역별 CN값은 한국수자원공사에서 1995년에 발행한 '임진강 유역 조사(1차) 보고서'의 CN값을 참조하였다. 남한지역에 대해서는 각각의 소유역별로 토양군 및 토지이용상 태별 지배면적을 산출한 후 소유역별 CN 값을 산정하였다. 한편 북한지역에 대해서는 토양군의 결정이 불가능하므로, 4개의 수문학적 토양군별로 100년 빈도 홍수량을 이용하여 간접적으로 이북지역에 대한 토양군을 추정한 후 DMZ 이북지역의 각 소유역에 대한 토양군의 면적구성비를 각 토양군에 적용하여 소유역별 CN 값을 산정하였다.

소유역으로부터의 유출량 산정을 위해 채택한 Clark방법의 적용을 위해서 필요한 매개변수는 유역면적, 유역의 도달시간 및 저류상수이며 이러한 매개변수인 유역의 도달시간 결정을 위해서는 Kraven공식을 적용하였고 저류상수값은 시행착오법으로 구하였다. 이상

의 절차에 의해 결정된 소유역별 HEC-1 모형의 입력자료는 〈Table 6〉과 같다.

3) 하도 자료

하도 홍수추적을 위해 채택한 Muskingum-Cunge 방법의 매개변수로는 하도의 길이, 경사 및 수면폭이며 이들 매개변수인 하도의 길이와 경사는 임진강유역의 DEM(Digital Elevation Model)자료로부터 추출하였다. 또한 하도의 수면폭 결정에 있어서 남한지역은 기 시행한 하천정비 계획에서 실시한 측량성과를 이용하였고 북한지역은 우리 나라의 하천시설 기준에서 제시하고 있는 하천경사와 유량에 따른 하천폭 계산공식을 사용하였으며, 본류지점에 대해서는 이남지역의 하천폭과의 비례를 함께 고려하여 최종 하천 폭을 결정하였다. 그리고 하천의 조도계수는 저류함수모형에서 적용한 값을 사용하였다.

이상의 절차에 의해 결정한 하도 홍수추적을 위한 매개변수는 〈Table 7〉과 같다.

4) 저수지 자료

임진강 유역내의 저수지로는 '90.9.10~9.14과 '96.7.26~7.28.의 호우사상에서 비록 '96.7.26~7.28.의 호우사상에 의해 붕괴되었으나 비교적 홍수량 자료가 잘 관리되어 있는 연천댐만을 고려하였다. 저수지

<Table 6> Sub-watershed input data for HEC-1 model

No.	Watershed name	Area (km ²)	Channel length (km)	Elevation difference (m)	Ave. slope	Time of concentration (h)	Storage coefficient	CN (AMC-II)	Remarks
1	Beobdeung	338.0	22.592	1,224	0.05418	0.75	0.75	44.10	Imjin river basin
2	Pangyo	489.0	23.896	656	0.02745	1.13	1.13	43.90	
3	Hupyung	810.0	70.022	1,311	0.01872	4.02	4.02	43.20	
4	Icheon	681.0	47.052	630	0.01339	3.21	3.21	44.80	
5	Pyungancheon	396.1	62.562	950	0.01518	4.00	4.00	45.10	
6	Namsandong	794.1	57.520	468	0.00814	5.07	5.07	46.50	
7	Yukgokcheon	456.6	73.016	646	0.00885	6.17	6.17	51.60	
8	Gunnam	393.1	42.717	354	0.00829	3.73	3.73	47.50	
9	Dongducheon	254.5	29.994	950	0.03167	1.31	1.97	61.40	
10	Jeongok	60.1	10.996	337	0.03065	0.49	0.74	51.80	
11	Chatancheon	179.5	29.860	795	0.02662	1.43	2.15	68.30	
12	Jeokseong	144.0	22.733	130	0.00572	2.40	3.60	57.80	
13	Samicheon	404.6	39.812	618	0.01552	2.52	3.78	61.10	
14	Imjingak	250.0	38.276	117	0.00306	5.59	8.39	61.80	
15	river mouth	628.6	33.941	145	0.00427	4.17	6.26	66.60	
1'	Kimhwa	352.6	32.895	945	0.02873	1.51	2.25	52.50	Yeoncheondam watershed
2'	Hantan	450.7	64.920	404	0.00622	6.57	9.86	62.40	
3'	Kwanin	341.2	29.183	322	0.01103	2.20	3.30	63.10	
4'	Pocheoncheon	179.5	26.717	835	0.03247	1.11	1.67	62.20	
5'	Youngjung	219.8	26.229	1,050	0.04003	1.02	1.53	57.70	
6'	Yeoncheondam	294.5	27.914	383	0.01372	1.88	2.82	59.70	

<Table 7> Channel input data for HEC-1 model

No.	Start - End	Channel length(km)	Ave. slope	Roughness coefficient	Ave width (m)	Remarks
A	Beobdeung - Pangyo	28.853	0.00388	0.05178	200	Imjin river basin
B	Pangyo - Icheon	40.472	0.00215	0.04665	350	
C	Hupyung - Icheon	38.106	0.00294	0.04937	500	
D	Icheon - Namsandong	56.846	0.00148	0.04340	550	
E	Pyungancheon - Namsandong	17.258	0.00133	0.04248	600	
F	Namsandong - Gunnam	40.118	0.00057	0.03512	650	
G	Yukgokcheon - Gunnam	29.820	0.00131	0.04235	800	
H	Gunnam - Jeokseong	18.204	0.00071	0.03703	800	
I	Yeoncheondam - Jeongok	10.630	0.00113	0.04106	550	
J	Dongducheon - Jeongok	8.009	0.00262	0.04837	250	
K	Jeongok - Jeokseong	19.363	0.00067	0.03652	600	
L	Chatancheon - Jeokseong	20.742	0.00116	0.04129	700	
M	Keokseong - Imjingak	29.778	0.00010	0.02000	900	
N	Samicheon - Imjingak	29.128	0.00024	0.02760	900	
O	Imjingak - river mouth	17.737	0.00017	0.02461	1200	
AA	Kimhwa - Hantan	5.730	0.00087	0.03879	250	Yeoncheondam watershed
BB	Hantan - Kwanin	28.247	0.00294	0.04937	300	
CC	Kwanin - Yeoncheondam	20.241	0.00356	0.05103	300	
DD	Pocheoncheon - Youngjung	3.907	0.00128	0.04214	300	
EE	Youngjung - Yeoncheondam	10.996	0.00264	0.04843	350	

홍수추적을 위해 사용한 Modified-Puls 방법의 적용을 위하여 연천댐 지점의 입력자료인 저수지 홍수추적의 실행횟수는 1회로 설정하였고, 저수지의 저수위별 저류용량을 입력하였으며 연천댐은 홍수시에 홍수조절용량이 거의 없으므로 저수지의 초기수위를 저수지의 여수로 부분 표고로 설정하여 입력하였다.

3. 적용결과

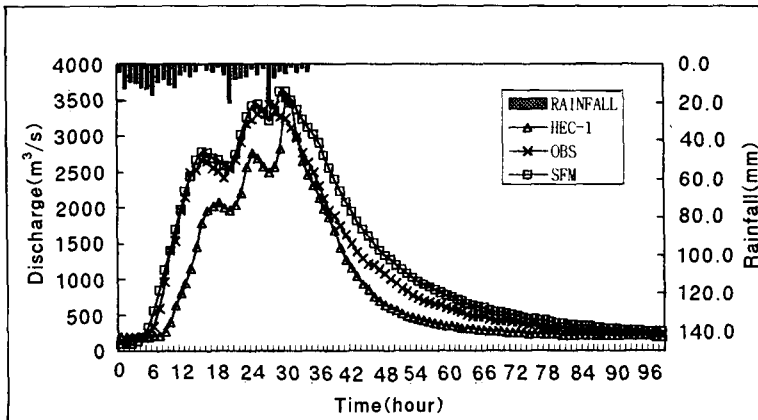
저류함수 모형 및 HEC-1 모형을 '90.9.10~9.14.과 '96. 7.26~7.28.의 수문자료를 적용하여 홍수량을 각각 산정하였다. 전술한 바와 같이 임진강 유역의 2/3가 북한 지역에 포함되어 있으므로 임진강 유역 전체에 대한 홍수기 수문자료가 부족하므로 본 연구에서는 남한지역 중 가용한 수문자료가 있는 연천댐 유역에 대해서만 저류함수 모형 및 HEC-1 모형을 적용하였다.

먼저 1990.9.10~9.14간의 수문자료를 저류함수 모형 및 HEC-1 모형에 적용하여 연천댐 유역의 홍수 유입량을 산정하였으

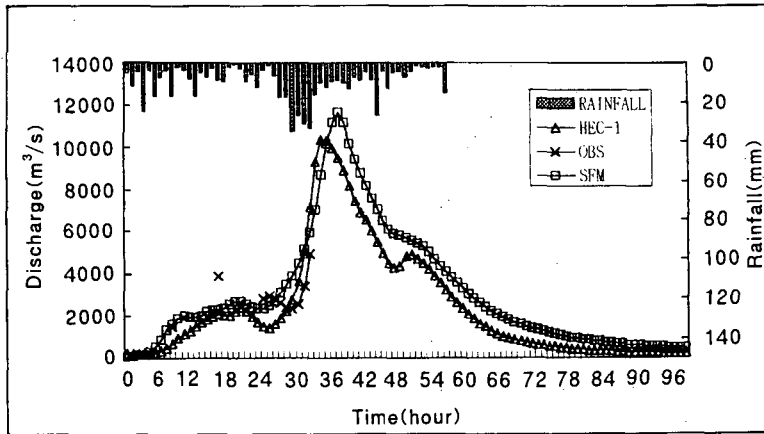
며, 이와 같이 산정한 홍수량의 값을 연천댐 지점에서 실측한 댐 유입량 자료와 비교한 결과는 <Fig. 5>와 같다.

1996.7.26~7.28간의 수문자료를 저류함수 모형 및 HEC-1 모형에 적용하여 연천댐 유역의 홍수유입량을 산정하였으나, 연천댐에서의 실측 유입량 자료는 댐 월류전 자료만 있어 결과에 대한 비교는 댐 월류전 자료만을 수행하였고. 그 결과는 <Fig. 6>과 같다. 한편 <Table 8>은 상기 2개 호우사상에 대한 실측 및 각 모형에 의한 산정결과를 요약한 것이다.

<Table 8>에서 홍수사상 Case1의 경우 모형별로 첨두유량을 비교해 보면 저류함수 모형에서는 실측치 대비 계산치가 105%로 크게 산정되었고 총유출고 역시 실측치 대비 계산치가 105%로 크게 산정되었으며, HEC-1 모형에서는 첨두유량이 실측치 대비 계산치가 103%로 크게 산정되었으나 총유출고는 실측치 대비 계산치가 76%로 작게 산정되었다. 유출율은 저류함수법에서 실측치보다 계산치가 크게 산정되었고 HEC-1 모형에서는 실측치보다 계산치가 작게 산정되었다.



<Fig. 5> Comparison of observed and simulated hydrographs at Yeoncheondam (Sept. 10~14, 1990)



<Fig. 6> Comparison of observed and simulated hydrographs at Yeoncheondam (July 26~28, 1996)

<Table 8> Summary of observed and simulated results

Storm events	Peak discharge(m ³ /s)			Discharge amount(mm)			Runoff ratio(%)			Lag time(h)		
	Obs.	SFM	HEC-1	Obs.	SFM	HEC-1	Obs.	SFM	HEC-1	Obs.	SFM	HEC-1
case1	3,439	3,624	3,539	233.0	245.1	176.2	85.8	90.2	64.8	5.0	7.0	7.0
case2	-	11,671	10,351	-	602.1	468.3	-	93.9	73.0	-	8.5	5.5

이는 저류함수법 및 HEC-1 모형의 매개변수 산정에서 발생하는 오차로 사료되며, 특히 HEC-1 모형의 오차는 CN 값의 결정에 있어 북한지역의 토양정보의 부재가 주요원인으로 판단된다.

Case2의 경우는 댐 붕괴 이후의 실측값이 없어서 저류함수법 및 HEC-1 모형 모두 호우 사상 전반에 대한 직접적인 비교가 불가능하여 계산치의 결과만을 <Table 8>에 제시하였다.

IV. 레이더 강우자료의 활용방안

임진강은 유역의 2/3가 북한에 위치하고

있고 나머지 유역도 대부분 군사보호지역으로 되어 있어 홍수조절용 댐의 건설은 물론 홍수예경보 체계 구축을 위한 수문정보를 제대로 얻을 수 없는 특수한 지역이다. 또한 임진강은 북에서 남으로 비교적 직선으로 흐르고 있고 여름철 강수량의 집중도 상대적으로 크기 때문에 유역면적에 비해 홍수량이 크게 나타나는 것으로 추정된다.

이미 겪은 바와 같이 1996년 여름 서울 북부 임진강 유역의 집중호우는 현재 미개발 상태인 임진강 유역에의 관심과 중요성을 부각시켰으며, 동 유역에 대한 수문관측 및 연구의 필요성이 대두되었다. 현재의 상황으로는 집중호우시 북한지역에서 발생하는 유출

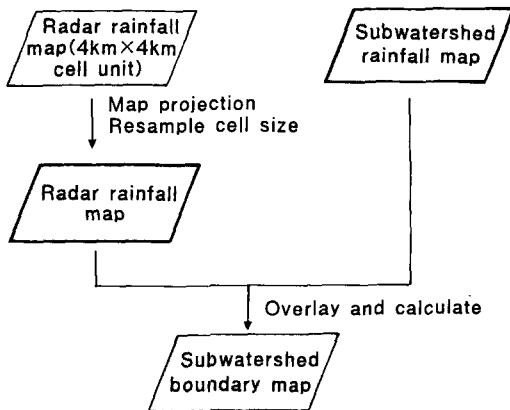
을 예측하는데 있어 가장 근본이 되는 북한 지역의 강우자료를 신속하게 획득한다는 것은 불가능하다. 따라서 북한지역을 포함한 임진강 유역의 강우관측용 레이더의 설치는 기본적인 유역관리 측면에서 필수 불가결하다고 말할 수 있겠다.

임진강 유역을 대상으로 한 강우레이더가 설치되면 레이더 자료는 최소 5분 간격으로 유역내의 강우가 관측되고 일반적으로 현재부터 3시간 후까지의 강우량을 예측하는 상황이 된다. 5분 간격의 레이더 강우는 기존의 소프트웨어를 이용하여 원하는 시간동안의 누가강우량으로 처리되며, 우리 나라의 레이더 자료는 격자의 크기가 가로 4km × 세로 4km, 총 격자의 수는 40,000개(가로 200 × 세로 200)로 구성되어 있으며, 자료의 형태는 Byte이다.

임진강 레이더 강우자료를 유출모형의 입력자료로 이용하기 위해서는 일련의 처리과정을 거쳐야 한다. 유출모형에 적용하기 위한 과정은 다음과 같다. ① 임진강 유역(경도 : 126° ~128° / 위도 : 37.5° ~39.5°)을 포함하도록 레이더 강우자료를 잘라낸다. ②

Raster-based GIS 소프트웨어(예, IDRISI)를 이용하여 좌표변환(예, UTM- 52N)하고, 소유역 분할도와 같은 격자크기로 RESAMPLE한다. ③ 레이더 강우자료와 동일한 형태로 임진강 소유역 분할도를 작성한다. ④ 레이더 자료와 소유역을 각각 중첩(OVERLAY)하여 소유역별 평균 강우량을 산정하므로써 유출모형의 입력자료를 준비한다. 이 과정을 정리하면 <Fig. 7>과 같으며, 레이더 강우를 임의로 작성하여 이들을 입력자료로 받아들이는 예는 <Fig. 8>과 같다.

임진강의 주요지점별 유출량을 실시간 예측하는데 있어 고려하여야 할 사항으로서 모형의 계산시간 간격(실제 운영)을 들 수 있는데, 이는 레이더 강우자료의 처리에 영향을 미친다. 레이더 강우가 5분 간격으로 관측되므로 매 5분마다의 누가강우량으로 처리가 가능하지만, 실제 유출모형의 실행 및 그 진행과정을 보기 위한 시간간격은 더 커질 수도 있다. 이는 강우현상의 종류와 유출의 전반적인 변화양상을 얼마나 볼 것이냐에 따라 다를 것이다. 만약 강우가 1~2시간 이내의 집중호우라면 실행시간 간격을 5분~10분으로 줄여



<Fig. 7> Process diagram incorporating radar rainfall data into simulation models



<Fig. 8> Example handling process of radar rainfall data by using raster-based GIS software, IDRISI.

주어야 할 것이고, 장마기의 전형적인 호우이면 2~3일 동안의 간헐적인 강우형태에 대한 유출의 전반적인 양상을 보아야 할 것이므로 계산시간간격을 30분~1시간 간격으로 늘려주는 것이 좋을 것으로 판단된다.

V. 결론

향후 강우레이더의 설치에 따른 임진강 유역의 홍수기 유출예측을 위하여 기존모형인 저류함수 모형과 HEC-1 모형을 임진강 유역에 적용·검토하였으며, 아울러 레이더강우 자료를 이들 모형에 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 모형의 적용성을 파악하기 위하여 1990년 9월과 1996년 7월 두 개의 홍수 수문사상을 이용하여 연천댐 유역의 홍수유출량을 모의하였다. 1990년 9월 홍수 수문사상의 경우 실측치와 계산치의 비교결과 도식적으로 저류함수 모형 및 HEC-1 모형에서 각각 근사한 결과를 나타내었고, 저류함수 모형에서는 첨두유량, 총유출고 그리고 유출률에 있어서는 계산치가 조금 크게 산정된 반면 HEC-1 모형에서 첨두유량은 계산치 보다 크게 그리고 총유출고 및 유출률에 있어서는 계산치가 조금 작게 산정되었다. 1996년 7월 홍수 수문사상의 경우는 실측 수문자료가 없어 계산치와의 비교를 수행할 수 없었다.

2. 임진강 유역의 2/3가 이북지역에 위치하고 있어 수문자료의 취득이 불가능하며, 이남지역도 수문관측 밀도 및 자료의 정도가 높지 않아 실질적으로 유출모형의 매개변수 결정에 많은 문제가 있었다. 향후 이 지역에 강우레이더가 설치된다면 이들에 의한 북한 및 남한 지역의 수문자료 획득으로 임진강 유역에 대한 모형의 매개변수를 지속적으로

추정해 나가야 할 것이다.

3. 실시간 On-Line 운영체제 정립시 실측치와 계산치를 일치시키기 위한 각 변수들의 조정이 가능하고, 특히 우리 나라와 같이 지형성과 계절성이 강한 우기에는 호우의 임의성이 강하기 때문에 현재의 실정에서는 임진강 유역의 홍수유출 예측을 위해서 저류함수 모형과 HEC-1 모형의 이용이 가능하리라 사료된다.

4. 레이더 강우자료를 유출모형의 입력자료로 이용하는 방법을 제시하였다.

참고문헌

1. 건설부, 한강홍수통제소, 1991. 한강수계 유출프로그램 개선방안.
2. 고려대학교 방재과학기술연구소, 1996. 1996년 7월 경기 북부지역의 홍수상황 및 조사분석.
3. 한국건설기술연구원, 1993. 수문모형 평가에 관한 연구-강우-유출모형을 중심으로-.
4. 한국건설기술연구원, 1996. 1996년 7월 임진강 유역 대홍수.
5. 한국수자원공사, 1990. 홍수분석모형에 관한 연구.
6. 한국수자원공사, 1995. 임진강 유역조사(1차) 보고서.
7. 한국수자원공사, 1996. 홍수시 유역강우 산정을 위한 기상자료의 효율적 활용방안 연구(II).
8. 한국수자원공사, 1997. 임진강 유역의 홍수기 강우-유출 모형 개발.
9. U.S. Army Corps of Engineers, 1990. HEC-1, Flood Hydrograph Package, User's Manual, Hydrologic Engineering Center.