

# 유역특성을 고려한 적정 강우-유출모형의 제시에 관한 연구

## A Study on Proposal of Appropriate Rainfall-Runoff Model With Watershed Characteristics

최한규\*      백경원\*\*      최용묵\*\*\*  
Choi, Han-Kyu      Baik, Kyung-Won      Choi, Yong Mook

### Abstract

The purpose of this study is to investigate the applicability of Nakayasu & SCS method and Clark method to the computation of runoff from the river basin in Soyang watershed.

As the result, each runoff was conducted to compare and analyze existing established peak flow model, and to propose a pertinent model.

키워드 : 강우유출모형

Keyword : Rainfall-Runoff Model

### 1. 서론

#### 1.1 연구배경 및 목적

국내의 강수량 현황은 여름에 전체 강수량의 2/3 이상 집중되는 것이 일반적 특징이며, 강원도는 이와 더불어 대부분이 산지인 관계로 이수 및 치수가 매우 어려운 자연적 입지 조건을 가지고 있다. 따라서 수자원 개발을 위한 연구가 매우 활발하게 진행되어야 하는데도 불구하고 정부의 수자원 연구가 주로 5대 하천 연구에 편중되어 있으며 지방자치가 실시된 이후에는 더욱 심화되고 있다.

이러한 결과로 지방의 수자원에 대한 연구는 활발하게 이루어지고 있지 않아 1998년의 홍수처럼 특정 지역에 편중되어 집중적으로 오는 홍수에 대하여 지방 자치단체의 독립적인 예·경보 시스템이 체계적으로 이루어져 있지 못해서 많은 인명 및 재산상의 피해를 보았으며 이러한 지역적인 호우에 의한 피해는

매년 증가하는 추세에 있다.

이러한 취지에서 지방의 수자원에 대한 연구가 절실하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 강원도 내의 대표적 하천인 소양강 유역의 내린천과 홍천강 본류에 대하여 기존의 강우-유출모형을 적용하여 그 적용성을 검토한 후 최적모형을 제시하여 이·치수의 기본계획에 활용할 수 있도록 하며, 향후 홍수 예정보체제의 구축시 기본자료를 제공하고자 하는데 있다.

#### 1.2 연구동향

일반적으로 강우-유출모형은 주로 도시 및 공단의 배수체계의 설계, 댐의 여수로 설계, 하천제방의 설계 등에 필요한 설계홍수량의 결정 등의 공학적, 행정적인 관계를 해결하기 위한 단시간의 호우사상을 해석하는 모형을 의미하며, 19세기 후반부터 개발되기 시작하였다.

19세기말과 20세기초 초기에는 주로 경험적인 결과를 응용하는 경험식이나 합리식을 사용하였으며, 이는 소규모 유역에 적합한 유출해석방법으로 실측치와는

\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 한림정보산업대학 토목과 교수, 공학박사

\*\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정

많은 오차를 포함할 수밖에 없는 문제점을 가진 모형이라고 할 수 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 1932년 Sherman은 중첩의 원리를 근거로 단위 유효우량에 의한 유출해석방법인 단위도 이론(unit hydrograph theory)을 개발하였다. 초기 단위도 이론은 직접유출과 기저유출의 분리, 유효강우량의 결정, 단위도의 결정과정에서의 주관적인 요소에 의한 부정확성이 내포되어 있었다.

그러나 이후 지형학적 인자의 실측에 의한 보정과 미국 토양보존국(SCS : Soil Conservation Service)의 연구 등을 통해 유효강우량을 산정하는 방법의 개선이 이루어 졌다.

1960년대에는 수문순환의 각 성분과정을 각각 개념적으로 모형화하는 작업이 시도되었는데, 이러한 모형에는 Stanford Watershed Model IV, SSARR, 저류함수법, TANK Model 등이 있다. 이들 모형들은 수많은 매개변수를 포함하고 있으며, 이들 매개변수들의 최적 추정과정에 있어 실제 현상과는 상이한 결과를 나타내는 경우가 있다.

1970년대 이후에는 홍수에·경보, 저수지나 수공구조물의 관리를 위한 실시간 예측모형(Real-time Forecasting Model)이 개발되기 시작하였으며, 최근에는 물리적 현상에 대한 기존의 지식을 활용하여 강우에 의한 유출량을 산정하는 확정론적 모형(Deterministic Model)과 물리적인 성분으로 파악할 수 없는 부분에 대한 통계학적인 접근으로 추론하는 통계학적 모형(Stochastic Model)이 연구되고 있다.

특히 컴퓨터의 발달에 따른 통계처리능력의 향상과 지리정보시스템(GIS)의 활용을 통한 기초자료의 수집이 용이해지면서 정확한 유출량 산정모형들이 개발되고 있다.

### 1.3 연구의 내용

강우에 의해 발생하는 유출량을 산정하는 방법은 여러 가지 종류의 모형이 이미 제시된 바 있으므로 강우-유출모형은 사용하고자 하는 목적에 따라 다양하게 적용할 수 있다. 즉, 모형의 정확성에 대한 기준은 입력자료인 임의의 수문조건 하에서 사용자의 필요성에 따라 적절하게 활용할 수 있다는 것이다.

이는 사용자가 높은 정확도가 필요한 경우 사용하여 하는 모형은 더 많은 수문자료를 입력치로 요구하게 되며, 이를 위해서는 많은 예산과 인력을 투입하여 세밀한 측정자료를 먼저 수집해야 한다. 이와 반대로 해당구역의 기초 수문자료가 없거나 정확도보다는 대략적이거나 신속한 계산결과가 요구되는 경우에는 적

은 입력치로도 계산가능한 모형을 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 모형의 정확도와 입력자료의 수는 교호(trade-off)적인 관계라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 소양강 및 홍천강의 강우에 의한 유출모형 개발을 하기 위해서 다음의 사항에 대해 중점을 두었다.

#### (1) 모형의 간편성

모형은 실무자 등이 사용하기 용이하도록 구성하였다. 또한 실제 홍수발생시 강우가 시작된 이후 관측된 강우자료와 지형만을 입력하도록 하였으며, 출력자료를 명확하게 파악할 수 있도록 하였다.

#### (2) 모형의 적용성

각 하천구역의 수문특성이 매우 다양하게 나타나기 때문에 이를 고려하여 어떠한 구역에 대해서도 모형을 적용할 수 있도록 보편적인 모형을 바탕으로 프로그램을 구성하였다. 또한 지도의 축척에 따라 지형인자의 확정치가 심하게 변동할 수 있다는 점을 감안하여 대표적인 지형인자를 파악할 수 있도록 모형을 구성하였다.

#### (3) 예측의 합리성

본 연구에서 제시한 모형의 초기 입력자료가 간단한 만큼 모형의 정확도가 떨어질 수 있다는 점을 감안하여 실제 실측치와 비교를 통해서 원인분석을 하고 보정을 실시하였다.

이러한 점들을 고려하기 위하여 소양강 및 홍천강 구역의 강우 특성에 대해서 분석하고 홍천강 구역의 형상에 관해서 연구하였으며 토지의 이용상태 및 지질상태에 관해서도 자료를 수집하여 분석하여 최종적으로 유출모형을 적용, 검토하였다.

### 1.4 연구의 절차

본 연구의 최종목표인 강우-유출모형의 적용을 위하여 실시한 절차를 보면 다음과 같다.

#### (1) 자료 수집

- ① 구역의 강우자료 수집
- ② 구역의 형상 및 지질, 토지이용 자료의 수집
- ③ 유량 측정자료의 수집

#### (2) 자료의 분류 및 자료 분석

#### (3) 강우-유출모형의 적용

#### (4) 각 모형에 의한 홍수수문곡선의 검토 및 검토

위와 같은 절차에 의하여 모형을 적용하였으며, 최종적으로 제시된 모형을 실무에서 쉽게 적용하기 위하여 프로그램화 하였다.

## 2. 이론적 배경

## 2.1 강우-유출 관계

비가 오기 전의 기간을 무강우기간이라 하는데, 이때 유역 내 지하수위는 낮고, 무강우기간이 길어질수록 지하수위는 계속 하강하는 추세를 보이게 된다. 이때 하천수량은 지표면 및 수면으로부터의 증발산량에 의해 계속 감소된다. 이후 강우가 발생하면 내린 우량은 증발산, 차단, 저류에 의해 대부분 손실로 없어지므로 유출량은 없다고 할 수 있다. 그러나 일정한 강도의 강우가 계속되면 강우가 지속됨에 따라 손실되는 수량은 점차 없어지고 강우량이 침투율보다 커져 지표면을 통한 유출현상이 시작되며, 침투와 침투현상에 의해 지하수위는 상승하기 시작하며, 증발과 증산은 큰 변화없이 완만하게 진행된다. 그림 2-1은 각각의 강우강도와 침투능의 관계로 본 유출의 형태를 나타내고 있다.

이후 강우가 끝나고 다음 강우가 시작될 때까지의 기간이 비교적 장기간 지속되면 하천수, 지표면 저류량은 감소되고 증발산 현상이 활발해 진다.

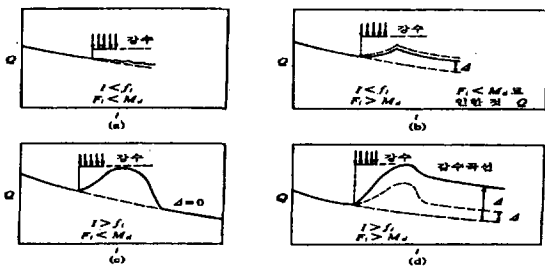


그림 2-1 각 경우의 수문곡선형

유역유출은 강우강도, 호우기간, 토양의 침투능, 토양의 피복상태, 식생형태, 유역면적과 관련된 형상요소, 호우의 공간적 및 시간적 분포, 유역의 유로구성형태, 유역의 기하학적 특성, 유역의 하천수리 특성, 지표흐름의 특성 등과 여러 가지 요인들의 작용에 의해 다양하게 변화하는데, 각 요소들의 불확실성에 대해 표현하면 다음과 같다.

### (1) 호우의 시간적인 분포에 따른 변화

일정기간 내에 동일유역 내에 같은 강우량이 내린다 하여도 시간별로 변화하는 강우량의 분포 즉, 강우강도(rainfall intensity)에 따라 유출의 양상은 달라진다. 이러한 기상학적 변동에 결정론적인 요소(deterministic component)뿐만 아니라 무작위적인 요소(random component)에 의해 영향을 받기 때문에 홍수에경보와 같은 예측분석의 정확도를 떨어뜨리는 요인이 된다.

### (2) 지점강우의 관측상의 불확실성

집중호우의 크기를 평가함에 있어서의 불확실성 뿐만 아니라, 강우자료의 관측과 해석자체에 관련된 불확실성도 존재한다. 강우 관측망은 대개 조밀하지 않으므로 많은 강우사상들을 측정하지 못하거나 강우강도가 우량계가 없는 다른 지역에서 발생하기도 한다. 뿐만 아니라 관측오차는 바람이나 우량계의 결에 기인하거나 관측자의 실수로도 발생된다.

### (3) 호우의 이동에 따른 불확실성

넓은 유역에 대한 연구에 있어 집중호우의 이동형태는 유출량을 산출하는데 대단히 중요한 요소이다. 이러한 개념과 관련해서 가정한 호우의 이동형태와 그에 상응하는 분포에도 상당한 오차가 포함되어 있다. 그러나 작은 유역에서는 이러한 모형변수를 제외할 수 있다.

### (4) 선행함수조건

대상이 되는 호우사상에 의해 발생하는 유출량은 강우량이 내리기 전 유역 전체에 걸친 토양이 수분을 포함하고 있는 정도에 따라 달라지는데, 이는 침투수량이 건조나 습윤정도에 따라 달라지기 때문이다. 이와 같이 해당 강우이전에 토양이 함유하고 있는 습윤상태를 선행함수조건(antecedent moisture condition)이라 한다.

### (5) 침투능

토양 피복두께, 피복상태, 다짐정도, 경작상태 등에 따라 오차가 발생하게 되며, 추가적인 불확실성으로는 실험실 관측오차, 토양형태의 이질성, 식물뿌리의 밀도, 지하수면 위치의 불확실, 그리고 토양층의 구성특성 등으로부터 발생한다.

### (6) 요면저류능력

각 유역은 본질적으로 유출을 저류할 수 있는 국지적인 요면을 가지고 있어서 유효 “강우-유출” 수지에서 저류된 유출량을 제외시켜야 한다. 이러한 요면저류는 집중호우사상의 발생에 대한 잔여요면저류능력과 관련되며, 요면저류의 분포와 크기에 대한 자료와 모형의 오차에 기인하여 저류능력에 대한 오차가 유발된다.

## 2.2 유효우량의 산정 방법

### (1) 유효우량(effective rainfall)의 정의

유출현상을 일으키는 총 강수량은 초과강수량(precipitation excess)과 손실량(losses or abstractions)으로 구성된다고 볼 수 있다. 초과강수량은 지표면 유출수의 형성에 직접적인 공헌을 하는 총 강수량의 한 부분을 말하며 손실량은 궁극적으로 지표면

유출수가 되지 않는 총 강수량의 한 부분을 말한다. 이러한 강수량의 손실은 앞에서 언급한 차단, 침투, 증발산 등의 이유로 발생한다. 따라서 직접유출수의 근원이 되는 강수의 부분을 유효강수량(effective preipitation)이라 하며 강수가 비인 경우를 유효강우(effective rainfall)이라 한다.

(2) 침투능의 정의와 지배인자

침투능(infiltration capacity)이란 일정한 조건하에서 토양면을 통해 물이 침투할 수 있는 최대비율로 정의할 수 있으며 침투능에 영향을 주는 지배인자에는 여러 가지가 있으나 크게 분류하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

① 토양의 종류

침투하는 수량은 토양속 공극(porosity)의 크기, 공극의 분포상태, 강우시 또는 관개용수 주입시 안정에 따라 크게 좌우된다. 즉, 모래질 토양에서는 공극이 비교적 크고, 안정성이 커서 침투능이 크게 나타나며, 점토질, 실트질 토양에서는 강우에 의해 미세 토입자들의 조직구조성이 분해되어 공극이 대폭 줄어들기 때문에 침투능이 적게 된다.

② 지면보류수의 깊이 및 포화층의 두께

침투현상은 토양속의 미소관의 흐름으로 해석할 수 있으며, 따라서 지표면에 저류되거나 머무르고 있는 수량이 직경  $d$ , 길이  $L$ 인 미소관을 통해 침투하는 경우를 생각할 때 포화층의 두께  $L$ 의 증가는 흐름에 대한 마찰력을 증가시켜 침투능은 감소되며, 강우가 계속되면  $L$ 은  $d$ 보다 훨씬 커지게 되어 일정한 값을 가지게 된다.

③ 토양의 함유분포

강우초기에 토양이 완전 건조상태이면 토양공극을 통해 심한 모관력(capillary force)으로 침투능이 커지다가 토양속의 콜로이드 물질이 부풀어져 공극이 줄어들고 시간이 지남에 따라 침투능이 감소하게 된다.

④ 토양의 다짐정도

토양이 다져지면 공극의 크기가 작아져서 침투능이 감소된다.

⑤ 식생피복

식생은 우수의 충격력으로부터 토양을 보호하는 역할, 조밀한 뿌리조직이 주위의 토양이 자져지는 것을 방지하여 공극을 보호하는 역할, 주위 유기물질이 흙의 상태를 스펀지 상태로 만드는 역할

⑥ 토양의 동결

토양이 물로 포화된 상태에서 동결되면 얼음으로 인해 불투수성이 되지만, 건조상태의 토양이 동결되면 표면이 부풀고 큰 공극이 생겨 침투성이 커진다.

⑦ 토양의 온도

토양공극내 흐름은 층류로 마찰력은 온도에 비례, 작아진다. 즉 같은 조건의 토양에서도 여름철의 침투능이 겨울철에 비해 크다.

(3) 유효강우량의 산정방법

본 연구에서는 토양의 침투능과 관련하여 유효강우량을 산정하는 방법으로  $\phi$ -지수법, W-지수법 등의 방법이 있으나 가장 널리 사용되고 있는 미토양보존국(Soil Conservation Service :SCS)의 유효강우량 산정에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

SCS의 유효강우량 산정법은 유출량 실측자료가 없을 때 사용할 수 있다는 점과 토양에 대한 오랜 동안의 실험에 의해 제안된 실험수치라는 장점으로 인해 많이 사용되고 있는데, 토양특성과 식생피복상태로 총우량으로부터 유효강우량을 산정하는 방법이다.

① 수문학적 토양군의 분류

어떤 지역의 토양특성은 유출의 시공적 변화에 가장 직접적인 영향을 미치는 인자로서, SCS방법에 있어서는 토양의 성질을 정량적으로 파악하기가 힘들기 때문에 이를 침투능을 기준으로 하여 4개의 토양군으로 나누었다. <표2-1>은 침투율이 큰 토양을 기준으로 분류된 A,B,C,D의 토양형의 특성을 나타낸 것이다. 즉, 토양형 A에서 토양형 D로 갈수록 침투율은 작아지게 된다.

<표 2-1> 토양형의 분류

토양형	토 양 의 성 질
Type A	낮은 유출률(Low runoff potential) 침투율이 대단히 크며 자갈이 있는 부양질, 배수 매우 양호(high infiltration rate)
Type B	침투율이 대체로 크고 (Moderate infiltration rate) 돌 및 자갈이 섞인 사질토, 배수 대체로 양호
Type C	침투율이 대체로 작고, 대체로 세사질토양층, 배수 대체로 불량
Type D	높은 유출률(High runoff potential) 침투율이 대단히 작고, 점토질 종류의 토양으로 거의 불투성, 배수 대단히 불량

<표 2-2> 토양형의 최소 침투율

SCS 토양분류	침투율(in./hr.)
Type A	0.30 ~ 0.45
Type B	0.15 ~ 0.30
Type C	0.05 ~ 0.15
Type D	0.00 ~ 0.10

<표2-2>는 <표2-1>과 함께 토양형을 명확하게 구분하기 위해 설정한 토양형별 최소침투율의 실험치

를 나타낸 것이다.

② 유역의 토양이용상태

유효우량은 유역의 토양종류 뿐만 아니라 유역의 토지이용상태에 따라 좌우된다. SCS에서는 <표 2-3> 과 같이 토지이용상태에 따라 유출곡선지수(runoff curve number)를 여러 가지로 분류하였다.

<표 2-3> 토양-피복형태별 유출곡선지수, CN, (AMC-II  $I_a=0.2S$ )

토지이용상태	피복처리상태	토양의 수문학적 조건	토 양 형			
			A	B	C	D
Fallow	Straight row		77	86	91	94
Row crops	Straight row		72	81	88	91
	Straight row		67	78	85	89
	Contoured		70	79	84	88
	Contoured		65	75	82	86
	Contoured and terraced		66	74	80	82
	Contoured and terraced		62	71	78	81
Small grains	Straight row		65	76	84	88
	Straight row		63	75	83	87
	Contoured		63	74	82	85
	Contoured		61	73	81	84
	Contoured and terraced		61	72	79	82
	Contoured and terraced		59	70	78	81
Close-seeded	Straight row		66	77	85	89
	Legumes or rotation	Straight row	58	72	81	85
		Contoured	64	75	83	85
	meadow	Contoured	55	69	78	83
		Contoured and terraced	63	73	80	83
	Contoured and terraced		51	67	76	80
Pasture or range			68	79	86	89
			49	69	79	84
			39	61	74	80
		Contoured	47	67	81	88
		Contoured	25	59	72	83
	Contoured		6	35	70	79
Meadow			30	58	71	78
Woods			45	66	77	83
			36	60	73	79
			25	55	70	77
Forests	very sparse		56	75	86	91
Farmsteads			59	74	82	86
Roads(dirt)			72	82	87	89
	(hardsurface)		74	84	90	92
Commercial and Business Area	85% impervious		89	98	94	95
Industrial Area	72% impervious		81	88	91	93
Residential Area	65% impervious		77	85	90	92
	30% impervious		57	71	86	86

③ 유역의 선행함수조건

유역의 토양이 해당 강수사상이전에 보유하고 있는 수분은 유출량의 변화에 큰 영향을 미친다.

토양에 이미 포함되어 있는 수분을 나타내는 지표는 5일 선행 강수량에 의해 표현되며, SCS에서는 다음과 같은 선행함수조건(Antecedent Moisture Condition : AMC)을 사용하고 있다.

AMC-I : 유역의 토양은 대체로 건조상태에 있어서 유출률이 대단히 낮은 상태(lowest runoff potential)

AMC-II : 유출률이 보통인 상태 (average runoff potential)

AMC-III : 유역의 토양이 수분으로 거의 포화되어 있어서 유출률이 대단히 높은 상태(highest runoff potential)

따라서 상기한 3개의 선행 토양함수조건을 분류하는 5일 선행 강수량의 크기는 <표2-4>와 같다.

<표2-4> 선행 토양함수조건 분류

AMC Group	5일 선행 강수량, $P_5$ (mm)	
	비성수기	성수기
I	$P_5 < 12.70$	$P_5 < 35.56$
II	$12.70 < P_5 < 27.94$	$35.56 < P_5 < 53.34$
III	$P_5 > 27.94$	$P_5 > 53.34$

④ 총우량과 유효우량과의 관계

SCS에서는 총우량과 유효강수량의 관계를 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (2-1)$$

여기서, P는 호우전 총우량(mm),  $I_a$ 는 호우의 초기손실(mm), S는 유역의 최대잠재 보유수량과 초기손실의 합(mm), Q는 유효우량(mm)이다.

위 식에서 초기손실  $I_a$ 는 유출이 시작되기 전에 생기는 차단, 침투, 지면저류 등을 포함하며, 0.2S로 가정하는 것이 일반적이다.

따라서,

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2-2)$$

식(2-2)에서 S는 유역의 잠재보유수량을 나타내며, 유역의 토양, 토지이용 및 처리상태 등과 같은 수문학적 토지피복형(hydrologic soil cover complexes)의 특성을 나타내는 것으로, 유출곡선지수(runoff curve number)를 다음과 같은 S의 함수와 <표2-3>의 CN 값을 사용하여 S를 구하게 된다.

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (2-3)$$

### 2.3 홍수도달시간

홍수도달시간(time of concentration)이란 강우가 해당 유역에 발생하였을 때 유역의 최상류점에서 최하류부까지 유량이 도달하는 데 소요되는 시간이라고 정의할 수 있다. 따라서 홍수도달시간이 될 때 하구부는 첨두유량이 발생되며, 이때가 치수를 위한 시설물의 설계기준이 되므로 홍수도달시간의 정확한 산정은 합리식의 적용상 가장 중요한 인자가 된다.

유역의 도달시간을 결정하기 위해서는 유역의 특성에 따라 하도흐름이 지배적인 경우, 지표면 흐름이 지배적인 경우, 그리고 하도와 지표면 흐름이 복합된 경우로 구분하여 결정한다.

#### (1) 하도흐름이 지배적인 유역

하도흐름이 주된 경우의 유역 도달시간은 일반 수리학에서 개수로 평균유속공식을 이용하여 하도길이를 유속으로 나눔으로써 쉽게 구할 수 있다. 이때 적용될 수 있는 평균유속공식은 Manning 공식 또는 Chèzy 공식 등을 사용한다.

#### (2) 지표면 흐름이 지배적인 유역

지표면 흐름이 지배적인 유역에서 도달시간은 주로 지표면의 지형학적 요소 (지표면 경사  $S$ , 지표면 흐름길이  $L$  등)와 저항계수 (합리식의 유출계수  $C$ , Manning의 조도계수  $n$  등), 그리고 유역에 내리는 강우강도( $I$ )의 영향을 받는다. 이러한 흐름에 적용될 수 있는 도달공식은 주로 자연하천 유역에서 Kraven 공식, Rziha 공식, SCS Lag Eqn. (1975) 등이 이용된다.

#### (3) 하도와 지표면 흐름이 복합된 유역

하도와 지표면 흐름이 중요한 역할을 하는 유역에 적용될 수 있는 공식에는 Kirpich 공식(1940), McCuen 등의 공식(1983), Eagleson 공식 등이 있다.

#### (4) 홍수도달시간 공식

홍수도달시간은 수년간의 관측치를 통한 강우강도에 따른 홍수도달시간의 산정이라는 작업이 선행되어야 하나, 우리나라의 경우 대하천 유역에 대해서도 아직은 실측치 자료가 완전하게 확보되지 못한 상태이기 때문에 외국의 실험에 의한 경험식을 사용하고 있다.

##### ① Kirpich 공식

1940년 Kirpich가 서부 Tennessee 지역의 급경사 농지 및 산지 지역의 실측자료를 기초로 제안한 경험공식으로 다음과 같이 나타내어 진다.

$$t_c = 3.976 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (2-4)$$

여기서  $t_c$ 는 홍수도달시간(min),  $L$ 은 유역의 최장

하천길이(km),  $S$ 는 유역의 평균경사( $H/L$ , m/m)

$H$ 는 유역출구점과 본류 최원점까지의 표고차이다.

이 식은 하천의 형태가 잘 구획되어 있는 자연하천, 나지형태의 지표흐름 등에서는 잘 일치하며, Rossmiler는 홍수도달시간의 보정계수를 산출된 유출계수에 곱하도록 제시한 바 있다. 그러나 일반적인 표면류나 자연하천의 경우 유출보정계수를 곱할 필요가 없다.

##### ② Rziha 공식

자연하천의 상류부( $S \geq 1/200$ )에 적용되는 공식으로 다음과 같이 표시된다.

$$t_c = 0.833 \frac{L}{S^{0.6}} \quad (2-5)$$

여기서  $t_c$ 는 홍수도달시간(min),  $L$ 은 유로연장(km)이며,  $S$ 는 유역의 평균경사로 무차원이다.

##### ③ Kerby 공식

지표면 흐름에 대한 도달시간을 산정하기 위하여 다음과 같이 제안되었다.

$$t_c = 36.225 \frac{(L \cdot N)^{0.467}}{S^{0.2335}} \quad (2-6)$$

여기서  $t_c$ 는 홍수도달시간(min),  $L$ 은 유로의 최원점으로부터 하천 유입부분까지의 직선거리(km),  $S$ 는 유로의 평균경사(m/m),  $N$ 은 유역의 조도(roughness)를 나타내는 상수이다.

### 2.4 강우-유출모형

본 연구의 대상이 되고 있는 지방자치단체가 관리하는 지방하천이나 준용하천은 전술한 바와 같이 하천의 수위, 유량관측기록이 수문해석을 수행하기 부족하거나 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 그동안 개발된 여러 가지 강우-유출모형 중에서 해당유역의 수문관측자료가 전무한 상태라고 가정한 상태에서 적용가능한 모형, 즉 합성단위유량도(synthetic unit hydrograph)를 연구의 대상으로 하였으며, 널리 알려진 합성단위도 기법 중에서 전술한 선정기준을 근거로 각 기법들을 적용한 후 그 결과를 비교, 검토하였다.

#### (1) SCS의 합성 단위도법

이 방법은 미국 토양보존국 (U.S. Soil Conservation Service : SCS)에 의해 합성단위유량도를 작성하기 위하여 고안된 방법으로서, 아래의 그림과 같은 무차원 단위도(dimensionless unit hydrograph)의 이용에 근거를 두고 있다.

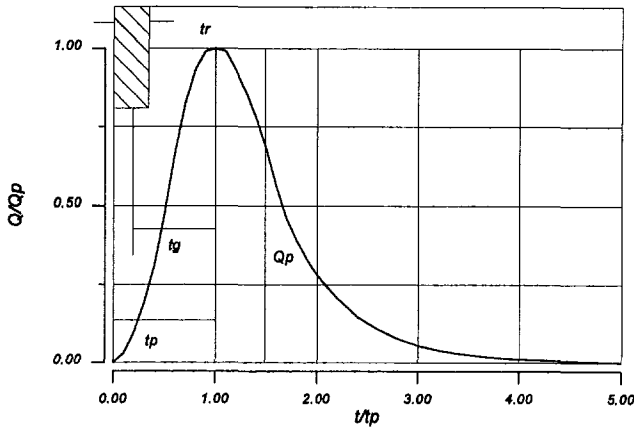


그림 2-2 SCS의 무차원 단위유량도

이 무차원 수문곡선은 미국 내 여러 지방의 대소 유역으로부터 얻은 실제의 단위도를 해석한 결과이며, 유역의 특성에 관계없이 적용할 수 있다는 장점이 있다.

이 방법을 사용하여 단위도를 합성하기 위해서는 단위도의 첨두유량  $Q_p$ 와 그의 발생시간  $t_p$ 를 결정하여야 하며, 일단  $Q_p$ ,  $t_p$ 가 결정되면 위의 그림의 무차원곡선이나 이 그림을 만들기 위해 사용한  $Q/Q_p$ ,  $t/t_p$ 의 비율을 나타낸 아래의 표를 사용하여 단위도를 합성하면 된다.

SCS에서는 위의 그림에서의  $Q_p$ 와  $t_p$ 를 산정하기 위한 식을 다음과 같이 추천한 바 있다.

$$t_p = \frac{1}{2} t_r + t_g \quad (2-7)$$

$$Q_p = \frac{484A}{t_p} \quad (2-8)$$

여기서  $t_p$ 는 강우시작시간으로부터 첨두유량 도달점까지의 시간(hr)이며,  $t_r$ 는 강우의 지속기간(hr)이며,  $t_g$ 는 우량의 질량중심으로부터 첨두유량 도달점까지의 시간, 즉, 유역의 지체시간(hr)이며,  $Q_p$ 는 첨두유량( $ft^3/sec$ )이고, A는 유역면적( $mi^2$ )이다.

<표2-5> SCS무차원 단위도의 비율에 따른 시간별 증거

$t/t_p$	$Q/Q_p$	$t/t_p$	$Q/Q_p$	$t/t_p$	$Q/Q_p$	$t/t_p$	$Q/Q_p$
0	0	0.9	0.990	1.8	0.390	3.4	0.029
0.1	0.030	1.0	1.000	1.9	0.330	3.6	0.021
0.2	0.100	1.1	0.990	2.0	0.280	3.8	0.015
0.3	0.190	1.2	0.930	2.2	0.207	4.0	0.011
0.4	0.310	1.3	0.860	2.4	0.147	4.5	0.005
0.5	0.470	1.4	0.780	2.6	0.107	5.0	0
0.6	0.660	1.5	0.680	2.8	0.077		
0.7	0.820	1.6	0.560	3.0	0.055		
0.8	0.930	1.7	0.460	3.2	0.040		

유역면적은  $t_g$ 에 가장 큰 영향을 주는 인자로서, SCS에서는 유역면적이 작은 경우 약 2,000acre=8.09372km<sup>2</sup>(이하)에서  $t_g$ 를 결정하기 위한 공식을 다음과 같이 제안한 바 있다.

$$t_g = \frac{L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900Y^{0.5}} \quad (2-9)$$

여기서, L은 하천의 총연장(ft), Y는 유역의 평균 경사(%), S는 SCS의 유효우량 산정법에서의 지표토층의 최대 잠재저류량(inch)으로서  $S = (1000/CN) - 10$ 의 관계를 가진다. 여기서 CN은 유출곡선지수이다.

(2) 中安(Nakatasu)의 합성단위도법

中安의 합성단위도법은 무차원 수문곡선(dimension-less hydrograph)으로서 이것을 이용하여 특정 지속기간의 단위유량도를 합성할 수 있도록 하는 방법이며, 기초 수문자료가 부족하고 산지유역인 곳에서 많이 사용되는 기법으로 그 개념도는 다음 그림과 같다.

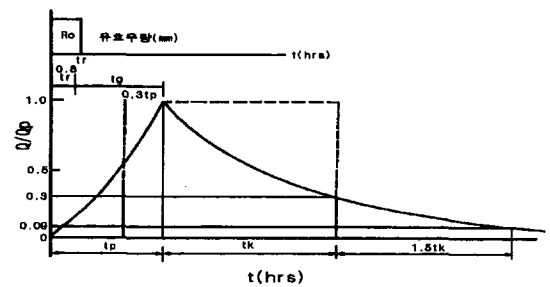


그림 2-3 中安의 합성단위도법 개념도

단위도상에서 수문곡선의 상승부와 하강부로 나누어 작성하며 지속시간  $t_r$ 인  $R_0$ 의 유효우량으로 인한 단위도를 다음과 같은 식으로 산정한다.

① 상승부 곡선 :  $\frac{Q}{Q_p} = \left(\frac{t}{t_p}\right)^{2.4} \quad (2-10)$

② 하강부 곡선 :

$$\frac{Q}{Q_p} = (0.3)^{\frac{t-t_k}{t_k}} : 0.3 \leq \frac{Q}{Q_p} \leq 1.0 \quad (2-11)$$

$$\frac{Q}{Q_p} = (0.3)^{\frac{t-t_k+0.5t_k}{1.5t_k}} : (0.3)^2 \leq \frac{Q}{Q_p} \leq 0.3 \quad (2-12)$$

$$\frac{Q}{Q_p} = (0.3)^{\frac{t-t_k+1.5t_k}{2t_k}} : (0.3)^3 \leq \frac{Q}{Q_p} \leq (0.3)^2 \quad (2-13)$$

여기서,  $Q_p$ 는  $t_r$ ,  $R_0$ 에 대한 첨두유량, Q는 호우시점으로 부터의 임의시각 t (hr)에서의 유량이며,  $t_r$ ,  $1.5t_k$ ,  $2t_k$ 는 각각 유량이  $Q_p$ 에서  $0.3 Q_p$ 로,  $Q_p$ 에서  $0.09 Q_p$ 로,  $0.09 Q_p$ 에서  $0.027 Q_p$ 로 각각 감

소하는데 걸리는 시간이다. 그리고  $t_p$ 는 호우시각에서 침투유량 발생시각까지의 도달시간이며,  $t_g$ 는 0.8  $t_r$ 시각으로부터 침투유량 발생시각에서의 침투유량의 지체시간을 의미한다.

$$t_g = 0.21 L^{0.7} \quad (L < 15\text{km}) \quad (2-14)$$

$$t_g = 0.4 + 0.058L \quad (L > 15\text{km}) \quad (2-15)$$

$$t_k = 0.47(AL)^{0.25} \quad (2-16)$$

여기서, L은 하천의 최대 유로연장(km), A는 유역면적(km<sup>2</sup>), 그리고  $t_g$ 는 ( $t_p - 0.8 t_r$ )시간이다.

$$\int Qdt = Q_p(0.3t_p + t_k) = 0.2778R_0A \quad (2-17)$$

$$\therefore Q_p = \frac{0.2778R_0A}{0.3t_p + t_k} \quad (2-18)$$

윗 식을 사용하면 유효우량  $R_0$ (mm)로 인한 단위도의 침투유량을 구할 수 있고, 무차원곡선을 이용하여 단위도를 합성할 수 있다.

### (3) Clark의 유역추적법

유역홍수추적법이란 하천유역을 일련의 저수지 또는 저수지와 하도로 구성되어 있다고 가정하여 개개의 저수지를 통해 아래와 같은 저류방정식을 풀이하는 수문학적 홍수추적의 하나로서, 순간단위유량도를 유도한후 이를 적용하여 특정호우로 인하여 발생하는 홍수유출수문곡선을 유도하거나 저수지의 유입량을 직접 계산하여 저류방정식에 입력, 유출량을 계산하는 방법이다.

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (2-19)$$

여기서 I와 O는 저수지의 시간별 유입량 및 유출량(CMS)으로 가정하는 Nash모형과 Clark모형이 대표적인 모형이라 할 수 있으며, 비선형(non-linear)으로 가정하는 대표적인 방법이 우리나라 홍수예경보 시스템에서 사용되고 있는 저류함수법이다.

#### ① Clark 유역추적법의 기본개념

Clark의 방법은 해당유역의 출구에 1개의 저수지가 있다고 생각하고, 유역 전체에 걸쳐 발생한 단위유효우량(1 cm)으로 인한 유수가 단순전이(pure translation)에 의해 저수지에 유입하여 저수지의 저류추적 과정을 거치는 것으로 가정하여 홍수추적을 함으로써 유역의 순간단위유량도를 계산하는 방법이다.

유역의 순간단위유량도가 결정되면, 원하는 지속기간 단위로의 변환은 단위유효우량에 대해 배수를 함으로써 쉽게 구할 수 있다.

#### ② 시간-면적 주상도의 작성

시간-면적주상도(time-area histogram)는 유역출구 지점의 유출량에 기여하는 시간구간별 배수면적을 표시하는 주상도로서, 이는 유역출구까지의 홍수도달 시간이 동일한 점을 연결하는 등시간선(isochrone)을 그려 전유역을 몇 개의 소유역으로 구분한 이후 작성하게 된다.

등시간선에 의한 소유역 구분은 전유역의 홍수도달 시간  $t_c$ 를 결정한 후 실측 수문곡선을 통하여, 일반적으로 미계측 유역에서는 Kraven이나 Rizha의 실험공식을 사용할 수 있다.

전유역의 홍수도달시간이 결정되면 유로길이(L)를  $t_c$ 로 나누어 유역내 평균유속(V)를 계산하고, 유도에 따른 홍수유출의 평균유속을 전하도 구간내에서 경사를 고려하여 등시간선을 구한다.

#### ③ 유역추적에 의한 순간단위유량도의 유도

위의 그림에서와 같이 동일유역에 순간적으로 발생한 단위유효우량으로 인해 유역출구지점의 저수지로 유입되는 등시간 구간  $\Delta t$ 시간동안 유입하는 홍수량은 다음의 식으로부터 구한다.

$$I_i = \frac{1}{0.36} \frac{A_i}{\Delta t} \quad (2-20)$$

여기서  $I_i$ 는 I시간구간에서의 유입량(CMS)이며,  $A_i$ 는 i번째 시간구간에 포함되어 있는 소유역 면적(km<sup>2</sup>)이다.

선형 저수지 가정에 의하면 저류상수(K)와 저류량(S) 및 유출량(O)의 관계는 다음과 같다.

$$S = KO \quad (2-21)$$

여기서 저류량은 [ $m^3/\text{sec} \cdot \text{hr}$ ], 유출량은 [ $m^3/\text{sec}$ ], 저류상수는 [ $\text{hr}$ ]의 단위를 가진다.

이 식을 저류방정식에 대입하고, 계산시간  $\Delta t$ 단위 별로 계산하는 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$O_2 = m_0 I_2 + m_1 I_1 + m_2 O_1 \quad (2-22)$$

여기서  $I_1, I_2, O_1, O_2$ 는 시간구간  $\Delta t$ 의 시점 및 종점에서의 유입량과 유출량을 나타낸다. 또한 상수  $m_0, m_1, m_2$ 은 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

$$m_0 = \frac{0.5\Delta t}{K + 0.5\Delta t} \quad (2-23)$$

$$m_1 = \frac{0.5\Delta t}{K + 0.5\Delta t} \quad (2-24)$$



$$m_2 = \frac{K - 0.5\Delta t}{K + 0.5\Delta t} \quad (2-25)$$

초기 유출량  $O_1 = 0$  으로 시작하여 유역추적을 하기 위해서는 저류상수 K의 결정이 선결되어야만 한다.

④ 저류상수 K의 결정

해당 유역의 실측 홍수수문곡선자료가 있는 경우에는 수문곡선이 변곡점에서의 유량  $Q_T$ 를 그 점에서 그은 접선경사 ( $dQ/dt$ )로 나누어 구할 수 있다.

$$K = - \frac{Q_T}{(dQ/dt)_T} \quad (2-26)$$

그러나 미계측유역에 적용하기 위해서는 위의 식을 적용할 수 없으며, 따라서 다음과 같은 식에 의해 저류상수 K를 결정하게 된다.

$$K = C \frac{L}{S} \quad (2-27)$$

여기서, C는 0.5~1.4의 수치를 가지는 상수이며, L은 유로연장(km), S는 유로경사(%)이다.

3. 자료의 해석

3.1 유역의 개황

소양강은 총 유로연장 166.2km로서 한강수계를 형성하는 북한강의 최대지류이며 오대산 부근에서 발원하여 남으로 유하하고 춘천시 동북 방에서 북한강과 합류한다.

소양강댐의 유역면적은 2,703km<sup>2</sup>로서 강원도의 5개 시군(인제, 고성, 양구, 홍천, 춘천)에 걸쳐 있다. 소양강댐은 높이 123m, 길이 530m, 그리고 체적이 9,600,000m<sup>3</sup> 인 사력댐(Rock Fill Dam)으로 1973년 10월에 준공된 다목적댐이다.

소양강댐 유역의 연평균 강수량은 1,152mm이며 유역으로 부터의 연평균유입량은 21억 3백만m<sup>3</sup>이다. 소양강댐 유역의 평균강수량은 우리나라의 연평균 강수량 1,274 mm보다는 다소 작고 세계평균강수량 970mm보다는 1.18배가 높다. 댐으로 인해 만들어진 소양호는 저수면적 64.3km<sup>2</sup>, 계획홍수위 EL.198m, 총저수용량 29억톤, 홍수조절용량 7억7천만톤에 달하는 우리나라 최대의 인공호수이다. 소양강댐을 효율적으로 운영하기 위하여 한국수자원공사 소양강댐사무소에서는 홍수예보경보시설을 갖추고 있으며 이 시설에는 수위국 4개소와 우량국 12개소가 포함되어 있다.

댐 유역의 토지이용 현황은 논 37.5km<sup>2</sup>, 밭 106.7km<sup>2</sup>, 임야 및 산지 2,410.8km<sup>2</sup>, 대지 6.4km<sup>2</sup>, 그리고 기타 141.4km<sup>2</sup>로 임야 및 산지가 전체유역의 89.2%를 차지

하는 산악지대이다.

홍천강은 우리나라의 중앙에 위치하고 있는 북한강의 第一支流로서 홍천군 서석면 검산리 하랫재에서 발원하며 춘천시 남산면 본말에서 청평호로 유입한다. 홍천강의 유역면적은 1,566.2km<sup>2</sup>이고 유로연장은 140.2km이다. 홍천강은 본류외에 약 30개의 준용하천이 지류로서 유입되고 있으며 홍천강의 하상경사는 하류지역은 청평호의 영향을 받아 약1/15,000 이상이며 중류지역은 약 1/800 그리고 상류지역은 약1/300 정도이다.

3.2 기하학적 특성

유역의 수문학적 특성은 그 지형인자에 따라 상당한 영향을 받는다 그러므로 지형적인 수문학적 분석에 매우 유용한 수단이 될 수 있다. 따라서 본 홍천강 유역내에서는 우량측정 이외에 수문관측자료가 별로 없어 기하학적 특성을 조명하므로써 모델의 정확도를 높일 수 있다. 기하학적 특성을 분석한 결과는 표 3-1과 같다.

<표 3-1> 대상지점의 기하학적 특성

수계명 (본류)	제1 지류	제2 지류	제3 지류	유역 면적 A(km <sup>2</sup> )	유로 연장 L(km)	유역 평균폭 A/L (km)	형상 계수 A/L <sup>2</sup>	비고
한강	북한강	소양강	내린천	1069.17	92.4	11.57	0.125	내린천 수위표지점
한강	북한강	홍천강		874.80	77.9	11.23	0.144	홍천교지점

3.3 강우 및 유량자료

(1) 우량관측소

내린천 및 홍천강의 실측강우는 다음과 같은 유역내의 관측소 자료를 사용하였다.

<표 3-2> 각 유역별 우량관측소

하천	대상관측소 명	비고
내린천	현리,창촌,상남,방동,귀둔,인제,군량	
홍천강	춘천,홍천,두촌,내촌,서석	

(2) Thiessen Network 작성

우량계가 유역 내에 불균등하게 분포되어 있어 Thiessen의 가중법(Thiessen's weighing method)을 사용하였다. 이 방법에서는 전 유역면적에 대한 각 관측점의 지배면적비를 가중인자(weighing factor)로 잡아 이를 각 우량치에 곱하여 합산한 후 이 값을 쉰

유역면적으로 나눔으로써 평균우량을 산정한다.

각 우량계의 지배면적은 우선 인접 관측점들을 직선으로 연결하여 삼각형을 만든 후 각각의 선분의 수직이등분선을 그어 각 관측점의 주위에 다각형(thiessen's polygon)을 만들어서 결정된다. 다각형으로 둘러싸인 면적이 곧 각 우량계의 지배면적 혹은 유효면적이 된다. 이 방법을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$P_m = \frac{A_1 P_1 + A_2 P_2 + \dots + A_N P_N}{A_1 + A_2 + \dots + A_N} = \frac{\sum A_i P_i}{\sum A_i} \quad (4-1)$$

따라서 위와 같은 방법으로 산정한 Thiessen의 면적과 그림은 표 4-1와 같다.

<표 3-3> Thiessen 면적

내린천	관측소	현리	창촌	상남	방동	귀둔	인제	군량	계
	면적(km <sup>2</sup> )	142.8	264.47	152.2	253.6	150.3	24.1	81.7	1069.17
	비(%)	13.4	24.7	14.2	23.7	14.1	2.3	7.6	100
홍천강	관측소	춘천	홍천	두촌	내촌	서화	-	-	
	면적(km <sup>2</sup> )	1	186.4	188.2	228.5	270.7	-	-	874.8
	비(%)	0.1	21.3	21.5	26.1	31.0	-	-	100

(3) 유량자료

강우-유출모형의 적용에 필요한 유량자료는 유역내 수위관측소의 실측 시수위자료를 수위-유량곡선식에 의해 유량으로 환산하여 이용하였다. 내린천의 경우 유역 내 내린천 수위표 지점, 홍천강의 경우는 홍천 수위표 지점의 자료를 이용하였다.

<표3-4> 각 지점 수위-유량곡선식

구 분	수위-유량곡선식	비 고
내린천	$Q = 10.04963(H + 1.433)^{2.629}$ $-0.5 < H < 9.0m$	내린천 수위표지점
홍천	$Q = 62.95732(H + 0.369)^{2.49}$ $-0.1 < H < 7.0m$	홍천교 수위표지점

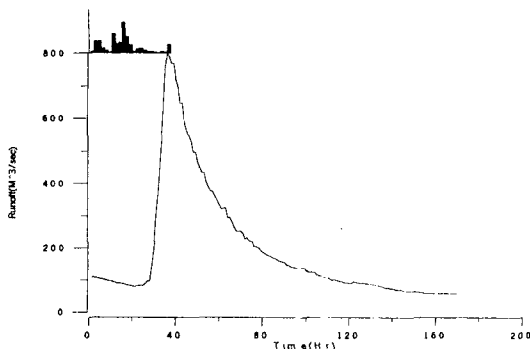


그림 3-3 내린천 실측 수문곡선(1998.8.14~8.21)

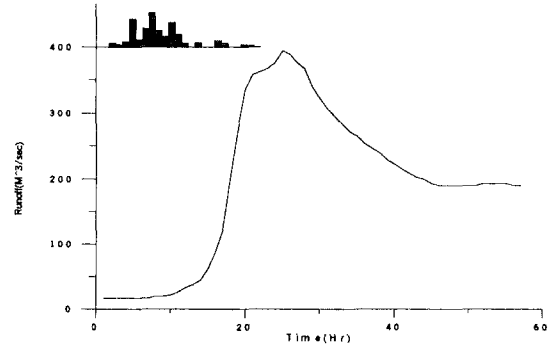


그림 3-4 홍천강 실측 수문곡선(1998.6.30~7.1)

4. 모형의 적용 및 검증

4.1 모형의 적용

우리나라에서 현재 실무에서 자연하천의 강우-유출 모형으로 많이 사용되고 있는 세가지 모형 즉, SCS의 합성단위도법, 중안의 합성단위도법, Clark의 유역추적법을 실측 우량자료를 이용하여 내린천과 홍천강에 적용하여 보았으며, 홍수수문곡선의 형태를 좌우하는 값들인 첨두유량, 첨두유량발생시간, 지체시간을 실측치와 비교해 보았다.

<표4-1> 각 방법별 계산치와 실측치

비 고		실측치	SCS	中安	Clark	비고
소양강 (내린천)	첨두유량(m <sup>3</sup> /sec)	798.85	316.86	641.70	570.11	
	첨두유량발생시간(hr)	18	34	16	21	
	지체시간(hr)	8	22	5	9	
홍천강	첨두유량(m <sup>3</sup> /sec)	394.17	356.08	531.22	617.56	
	첨두유량발생시간(hr)	21	24	14	16	
	지체시간(hr)	12	14	5	6	

각각의 모형을 실측 강우량 자료와 적용하여 유출 수문곡선의 형태 및 크기를 비교하여 본 결과, 내린천의 경우 첨두유량, 첨두유량발생시간은 중안식이, 지체시간은 Clark 방법이 실측 수문곡선과 가장 근접하게 나타나고 있으면 홍천강의 경우는 SCS방법이 가장 실측치와 비슷한 유형을 나타내고 있다. 채택된 두 유역의 모형에서 실측치에 비해서 작게 나오는데 이는 기저 유출량을 고려 하지 않았기 때문으로 판단된다. 따라서 기저 유출량을 고려해준다면 실측치와 보다 가까운 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료되어진다.

<표4-2> 각 방법별 첨두 유량 오차율

구 분	기저 유출고려 여부	SCS(%)	中安(%)	Clark(%)
내린천	×	60.3	19.1	28.6
	○	49.8	9.7	18.6
홍천강	×	9.6	34.8	56.7
	○	5.6	38.8	60.7

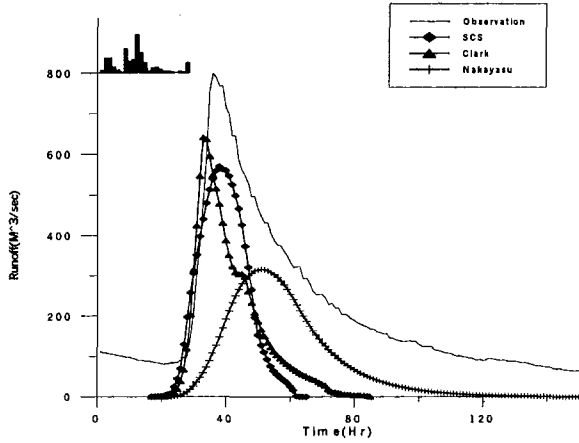


그림 4-1 내린천 각 방법별 수문곡선

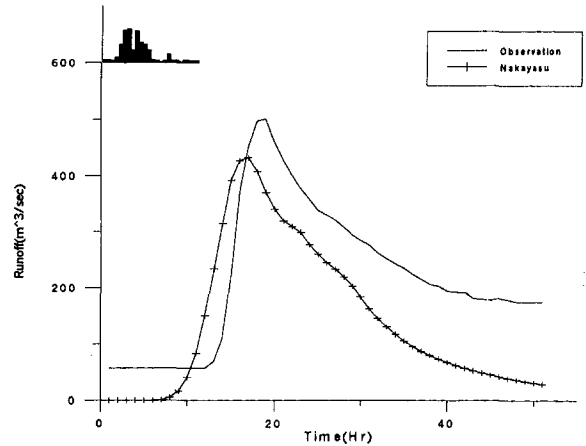


그림 4-3 내린천 수문곡선(1998.7.1~7.3)

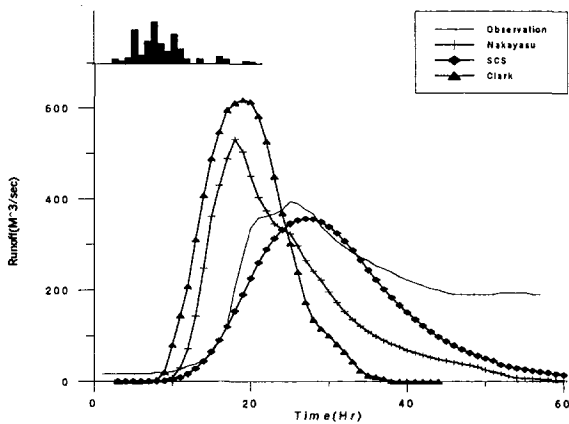


그림 4-2 홍천강의 각 방법별 수문곡선

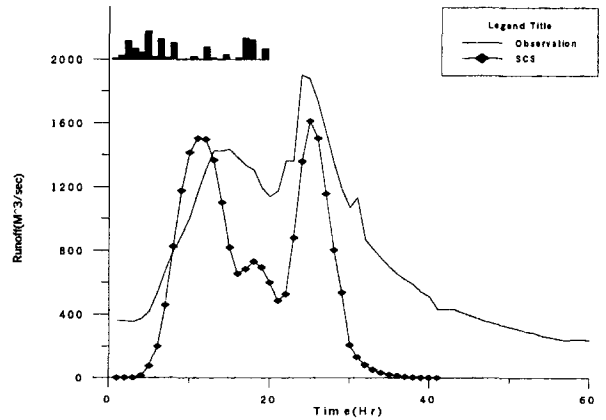


그림 4-4 홍천강 수문곡선(1998.8.8~8.10)

#### 4.2 모형의 검증

앞절에서 선정된 방법을 다른 실측강우사상(내린천 : 1998년7월1일부터 7월2일, 홍천강 : 1998년8월8일)을 적용해 보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

표4-3 모형 검증표

비 고		실측치	계산치	오차	기저유출량 포함
소양강 (내린천)	첨두유량 (m³/sec)	500.89	432.60	68.29 (15.8%)	47.4 (10.5%)
	첨두유량 발생시간(hr)	18	16	2	-
	지체시간(hr)	11	9	9	-
홍천강	첨두유량 (m³/sec)	1900.2 4	1612.70	287.54 (15.1%)	72.46 (3.8%)
	첨두유량발 생시간(hr)	24	25	1	-
	지체시간(hr)	3	4	1	-

#### 5. 결론

강원도 내의 하천에 대한 기존의 강우-유출모형을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 첨두홍수량, 첨두발생시간, 지체시간을 비교해 본 결과 내린천의 경우는 중안의 합성단위도 모형이 실측치와 유사한 결과를 보여 주었으며, 홍천강의 경우에는 SCS의 합성단위도 모형이 각각 유역에 적합한 강우-유출 모형으로 판단된다.

단, 홍천강 유역의 경우에는 유역 내에 여러 자류들을 포함하고 있어 강우의 분포특성에 따라 수문곡선의 형태가 다양하게 나타나 정확한 결과를 나타내기는 힘들었다.

2. 중안의 합성단위도의 경우 도달시간에는 민감하게 반응하지 않아 하상경사가 급하거나 완만한 유역에는 이에 따른 고려를 해주지 못하게 되므로 적용시 주의가 필요한 것으로 사료된다.

3. 유역특성에 적합한 도달시간 및 지체시간 공식을 채택함으로써 위 특성 변수들을 정확하게 적용하는 것이 실측치에 근접한 유출수문곡선의 산정에 중요한 과정이라는 것을 알 수 있었다. 특히 Clark모형을 적용할 경우, 저류상수 K에 민감하게 반응하였으므로 모형의 적용시 K값의 산정에 세심한 주의가 요구됨을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] Bell, F.C., "Characteristic Response Times in Design Flood Estimation", *J. of Hydrology*. Vol.8, 1969.
- [2] Brdys & Ulanici, "Water systems, Prentice hall", 1998.
- [3] Dooge, J.C.I., "General Theory of The Unit hydrograph" *J. Geophys. Res.*, Vol.64, 1959
- [4] Gupta R.S., "Hydrology and Hydraulic Systems", *Prentice Hall*, 1989.
- [5] Sing R V.P., "Hydrologic Systems", *Prentice Hall*, 1988.
- [6] Ven Te Chow, David R. Masdment, Larry W. Mays, "Applied Hydrology", *MacGraw-Hill Book Compaby*, 1988.
- [7] 국립방재연구소, *강우분석 프로그램의 개발*, 1998.
- [8] 한국지방행정연구소, "강우에 의한 유출량 산정모형", 1996.
- [9] 기상청, *기상관측월보*, 1998.1~1998.12.
- [10] 배덕효·조원철·허준행, "실시간 유량예측을 위한 추계동력학적 모형에 관한 연구", *토목학회논문집*, 제15권, 제2호, pp.433~442, 1995.
- [11] 한국수자원공사, *소양강댐 유량측정 보고서*, 1998.
- [12] 건설부, "영산강 홍수 예·경보 프로그램 개발", 1991.
- [13] 한국건설기술연구원, "우리나라 중소하천의 지형형태학적 인자의 분석", 1998.
- [14] 윤석영·홍석영, "Clark모형의 매개변수 산정방법 개선", *토목학회논문집*, 제15권, 제5호, pp.1287~1300, 1995.
- [15] 윤용남, "공업수문학", 청문각, 1996.
- [16] 이원환, "수리학", 문음당, 1997.
- [17] 임성형, "공학과 포트란90", 새론, 1997.
- [18] 정동국, "강우-유출모형에 관한 상태 및 매개변수의 추계학적 연구", *서울대학교 대학원*, 1989.
- [19] 佐藤勝夫, "洪水流出計算法", 山海堂, 1982.
- [20] "홍천강하천정비기본계획", 강원도, 1990.