

중소 하천유역에서 강우-유출관계의 개념적 모형 비교연구 -위천유역을 중심으로-

A Comparative Study of Conceptual Models for Rainfall-Runoff Relationship in Small to Medium Sized Watershed -Application to Wi Stream Basin-

이 정 식 * · 이 재 준 ** · 손 광 익 ***
Lee, Jung-Sik · Lee, Jae-Joon · Son, Kwang-Ik

Abstract

This study is to evaluate the accuracy and practicality of the existing four conceptual models, two linear models of Clark and Nash model and two nonlinear models of Laurenson and WBN model, and to select an appropriate model to simulate the rainfall-runoff process in a given catchment. The variability of parameters for linear models is generally larger than that of nonlinear models. The errors in peak discharge are similar among the four conceptual models but the errors in time to peak are quite different. Nonlinear models produce better results for time distribution than linear models. A comparison of the conceptual models to predict overall hydrograph using Friedman two-way analysis of variance by rank test indicates that nonlinear models are slightly better than linear models.

요 지

본 연구는 중소하천 유역에서 강우-유출과정의 모의를 위한 정도 높은 개념적 모형을 결정하기 위하여 기존의 개념적 선형 모형인 Clark 모형, Nash 모형과 개념적 비선형 모형인 Laurenson 모형과 WBN 모형을 위천 유역을 대상으로 적용 및 비교검토를 하였다. 선형 모형에서 산정된 매개변수들의 변동성은 비선형 모형의 매개변수의 변동성 보다 크게 나타났으며, 계측유역에서 4개 개념적 모형으로부터 합성한 수문곡선을 분석한 결과 침투유량은 4개 모형간에 큰 차이가 없으나 침투시간은 비선형 모형인 Laurenson 모형과 WBN 모형이 선형 모형보다 적합도가 높은 것으로 나타났다. 순위검정에 의한 Friedman의 이원분산분석 결과 침투유량을 예측하기 위한 4개 모형의 가능성간에는 모든 유역에서 어떤 유의한 차이도 나타내고 있지 않으나 유출수문곡선 전체의 재현성에서 비선형 모형들이 선형 모형들 보다 다소 우월한 것으로 나타났다.

keywords : conceptual model, linear model, nonlinear model, rainfall-runoff model, statistical test

- * 금오공과대학교 토목공학과 교수
- ** 금오공과대학교 토목공학과 부교수
- *** 영남대학교 공과대학 토목공학과 조교수

1. 서 론

자연하천 유역에서의 유출을 해석하고 예측하기 위하여 강우-유출간의 상호 관계를 구명한 강우-유출 모형들이 이용된다. 강우-유출 모형은 크게 시스템 모형과 물리적 모형으로 분류할 수 있다. 시스템 모형은 물의 순환 과정에서 실측된 변수들을 이용하여 변수들 간의 관계를 모형화하는 것으로서 대표적인 예로 단위도를 들 수 있으며, 물리적 모형은 유효강우에서 유출로 변환하는 동안 유역에서 발생하는 물리적 과정을 나타내는 모형으로서, 수리학적 모형과 개념적 모형으로 나눌 수 있다. 수리학적 모형은 부정류 흐름에서의 연속 방정식과 운동량방정식을 이용하여 유출해석을 수행하는 모형이며, 개념적 모형은 강우-유출과정의 수문학적 요소들을 물리적으로 상관시키기 위하여 수식화한 모형이다.

국내에서 널리 이용되고 있는 강우-유출모형은 단위도 모형과 개념적 모형이다. 수리학적 모형은 적용시 방대하고 복잡한 지형학적 관측이 요구되며, 계산과정이 복잡하기 때문에 실무에서의 강우-유출해석에는 많은 어려움이 따른다. 또한 단위도 모형은 선형성의 가정으로 인해 적용성이 높은 반면에 유역응답의 비선형성과 유역의 공간적 변화가 고려되지 않는 단점이 있다. 본 연구에서는 강우-유출과정의 물리적 과정에 근거를 두고 유역의 수문과정을 단순화시킨 개념적 모형에 대하여 검토하고자 한다.

개념적 모형은 매개변수의 공간적 변화의 고려 여부에 따라 집중정수 모형(lumped model)과 분포정수 모형(distributed model)으로 분류되며, 모형에서의 저류특성에 따라 선형 모형과 비선형 모형으로 나뉘어진다. 일반적으로 선형 모형들은 선형수로와 선형 저수지 등의 개념적 요소를 이용하여 유역의 수문응답을 나타내는 모형으로서 입력과 출력변수의 정도 높은 실측치로부터 구성된다. 중소하천 유역에서 현재까지 개발된 개념적 모형들의 적용 여부를 검토하기 위하여 기존의 대표적인 개념적 선형 모형인 Clark 모형, Nash 모형과 개념적 비선형 모형인 Laurenson 모형과 Watershed Bounded Network(WBN) 모형 등의 4개 모형들을 택하였으며, 이들 4개 모형들에 대하여 종합적인 비교 검토를 하므로써 정도 높은 개념적 모형을 결정하고자 한다. 본 연구의 목적은 기존 개념적 모형의 매개변수의 특성을 구명하며, 개념적 모형의 정도와 실용성을 평가하고 중소하천 유역에서의 강우-유출과

정을 모의하기 위한 적절한 개념적 모형을 결정하여 그 적용성을 입증하는 데 있다.

2. 유역과 수문자료

2.1 대상유역 현황

본 연구에서는 국제수문개발계획 대표시험유역인 낙동강 수계의 위천유역을 대상유역으로 선정하였다. 분석에 필요한 유역특성인자는 1/50,000 지형도로부터 획득하였으며, 대상유역의 유역특성인자는 표 1과 같다.

2.2 수문 자료

강우, 유출자료는 1983년~1992년에 걸쳐 대상유역의 수위관측소의 수위기록과 우량관측소의 우량 기록중 비교적 지속시간이 짧고 강우가 유역 전반에 걸쳐 균등하게 내린 호우사상을 선택하여 분석에 이용하였다. 1983년~1989년의 강우, 유출자료는 건설부(1991)의 수자원관리기법 개발연구조사 사업보고서에 수록되어 있는 시간강우량과 유출량자료를 이용하였으며, 1990년~1992년의 강우, 유출자료는 건설부(1990~1992)의 국제수문개발계획(IHP) 대표시험유역 연구보고서에 수록되어 있는 시간강우량과 유출량자료를 이용하였다. 분석에 이용된 호우사상수는 위천유역의 55개 호우사상으로 수문자료는 표 2와 같다.

표 1. 대상유역의 유역 특성인자

유역명	유역면적 A (km ²)	유로연장 L (km)	유로경사 S (m/m)	유역중심장 Lc (km)
무성	472.53	42.83	0.00353	20.60
병천	302.13	40.65	0.00369	17.10
미성	171.25	30.90	0.00417	18.90
고노	109.73	18.90	0.00754	9.70
동곡	33.63	8.00	0.01894	4.06
효령	151.05	21.80	0.01163	8.90

표 2. 대상유역의 수문자료

유역명	호우 사상수	시간간격 (hr)	첨두유량(m ³ /s)	
			최대	최소
무성	9	1.0	471.71	83.33
병천	9	1.0	312.25	55.42
미성	9	1.0	194.99	33.87
고노	9	1.0	120.33	20.13
동곡	10	1.0	38.90	8.28
효령	9	1.0	159.24	44.16

3. 개념적 모형 이론

개념적 모형이란 수문학적 요소들의 물리적 관계를 단순하게 표현하기 위하여 다변성을 갖는 수문계를 비교적 적은 수의 요소들로 수식화한 모형을 의미한다. 기존의 개념적 모형들 가운데 가장 널리 사용되고 있는 개념적 요소들은 저수지와 수로이며, 이들 개념적 요소들은 유역에서 유효강우에 대한 수문응답을 나타내는 특성을 내포하고 있다. 본 연구에서 논하고자 하는 개념적 모형들의 개념적 요소는 저수지이며, 이를 선형저수지와 비선형 저수지로 분류한다.

저수지에서의 저류방정식은 식 (1)과 같다.

$$I - Q = K \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

여기서 I 는 유입량, Q 는 유출량, K 는 저류상수로 개념적 선형 모형의 경우 유역에서 일정한 지체시간으로 나타낸다. 자연하천 유역은 비선형성을 갖고 있으며, 저류상수인 지체시간은 호우사상의 크기에 따라 변화한다. 일반적으로 저류효과와 지체시간은 홍수의 크기가 증가함에 따라 감소한다. 따라서 유역계의 비선형성을 지체시간의 변화로 나타낼 수 있으므로 저류상수 K 의 비선형 지체시간은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$K = aQ^b \quad (2)$$

여기서 a 와 b 는 회귀계수이며, a 는 저류상수 K 의 크기를 결정하고, b 는 비선형성의 정도를 나타낸다. 식 (2)에서 회귀계수 a , b 값이 주어지면, 임의의 순간유량 Q 에 대한 비선형 저류상수를 결정할 수 있으며, 식 (1)로부터 임의의 순간유입량 I 에 대하여 해석적 방법으로 유역출구에서의 유출수문곡선을 결정할 수 있다.

개념적 비선형 모형에서 홍수량의 크기에 따른 지체시간의 변화를 나타내고자 식 (3)을 이용하여 위천유역의 6개 소유역을 대상으로 지체시간과 홍수량의 크기간의 회귀분석을 실시하였다.

$$\text{Lag} = aQ^b \quad (3)$$

여기서 Lag 는 지체시간이다. Laurenson(1962)은 호주의 South Creek에서의 평균유량을 이용하여 $b = -0.27$ 을 얻었고, Askew(1968)는 호주 New South Wales주의 5개 유역에 대해 가중평균유량을 이용하여 $b = -0.19 \sim -0.33$ 사이의 값을 얻었으며 $b = -0.23$ 의 평균값을 채택하였다. 본 연구에서는 위천유역의 6개 소유역을 대상으로 Laurenson이 제안한 평균유량

을 이용하여 회귀분석을 실시한 결과 $b = -0.17 \sim -0.41$ 을 얻었고, Askew가 제안한 가중평균유량을 이용한 결과 $b = -0.17 \sim -0.38$ 사이의 값을 얻었다.

4. 개념적 선형 모형

4.1 Clark 모형

Clark 모형은 유역의 시간면적도를 이용하여 유역에 내리는 순간단위 유효우량으로부터 발생하는 유역출구에서의 직접유출 수문곡선인 순간단위도를 유도하는 모형으로 국내에서 널리 이용되고 있는 선형 모형이다. Clark(1945)는 유역의 출구에 한개의 선형저수지가 존재한다고 가정하였으며, 유역으로부터 유출량을 홍수 추적방법에 의해 결정하였다. Clark 모형의 개념도는 그림 1과 같다. Clark 모형에서 매개변수는 시간면적도의 기저시간 C 와 유역의 저류상수 K 이다. 첫번째 매개변수 기저시간 C 는 유역에서의 도달시간으로 강우가 유역의 최원점으로부터 유역의 출구에 도달하는 데 소요되는 시간을 말한다. 두번째 매개변수 K 는 시간의 차원을 갖는 저류상수로서 자연하도내의 저류량이 유출량에 미치는 저류효과를 나타내는 것이다. 또한 Clark 모형에서는 두가지 매개변수외에 도달시간과 능가면적간의 관계인 시간면적도가 필요하며, 이는 전체유역을 도달시간의 크기와 추적기간에 따라 적절한 등시간으로 나누어 결정한다. 유역에서의 도달시간을 결정하기 위한 많은 경험식들이 개발되어 있으나, 본 연구에서는 유효강우의 중심과 직접유출수문곡선 하강부의 변곡점까지의 시간간격을 도달시간으로 정의하였다. 본 연구에서 정의한 도달시간에 따라 대상유역의 55개 호우

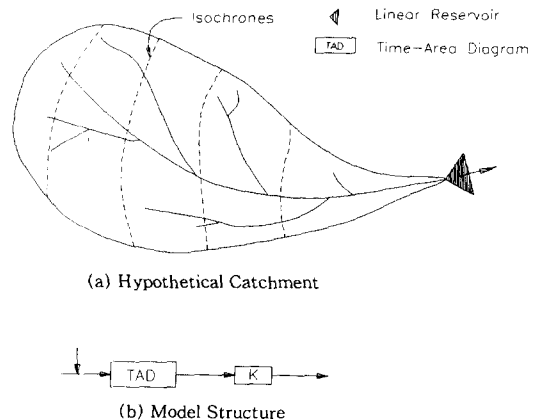


그림 1. 가상 유역과 모형구조 (Clark모형)

표 3. Clark 모형의 매개변수

유역명	유역평균 매개변수		K 의 변동계수
	C	K	
무성천	6.67	6.06	0.255
미성천	5.92	5.71	0.229
노성천	5.14	5.42	0.209
노성천	4.84	5.23	0.203
노성천	4.18	5.09	0.192
노성천	4.97	5.14	0.205
합	-	-	0.216

사상으로부터 매개변수 C를 결정하고, 각 대상유역에서 평균값을 취하여 유역평균 매개변수를 산정하였다.

Clark 모형에 의한 순간단위도 유도에서 시간면적도의 기저시간 C와 함께 필요한 매개변수는 저류상수 K이다. 저류상수 K는 일반적으로 실측수문곡선이나 모멘트법으로 결정할 수 있으나, 본 연구에서는 실측수문곡선으로부터 결정된 C값을 Clark 모형에 적용하여 합성수문곡선의 침투유량과 실측수문곡선의 침투유량이 일치되는 K값을 매개변수로 택하였다. 각 대상유역에서의 유역평균 매개변수는 K값의 평균치로 결정되었으며, 유

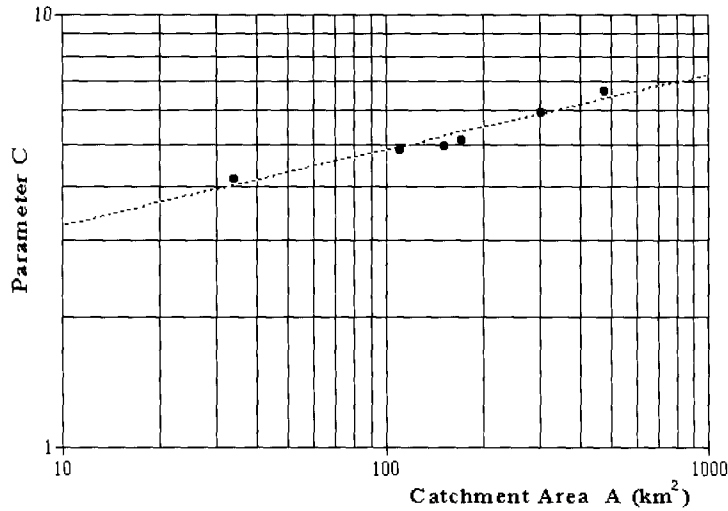


그림 2. 유역평균 매개변수 C와 유역면적과의 관계 (Clark 모형)

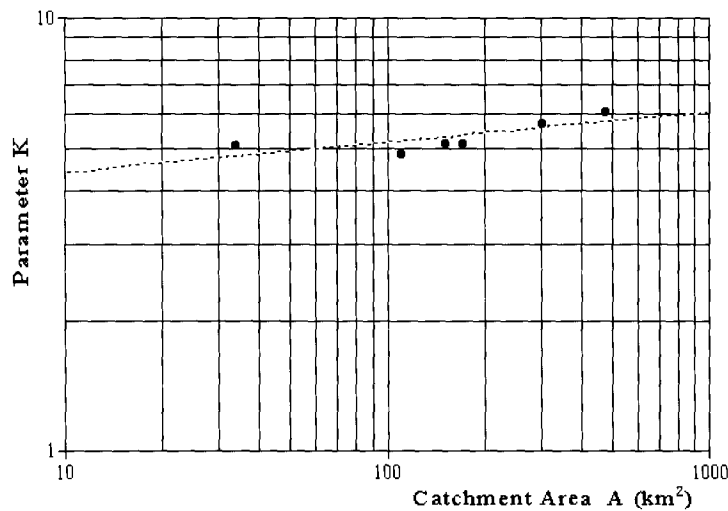


그림 3. 유역평균매개변수 K와 유역면적과의 관계 (Clark 모형)

역평균 매개변수 C 와 K는 표 3과 같다.

유역에서 신뢰할 수 있는 자료와 정도 높은 모형을 사용한다면 모든 호우사상에 대하여 동일한 매개변수를 적용시켜야 한다. 바꾸어 말하면 동일 유역에서 서로 다른 호우사상으로부터 유도된 매개변수들은 항상 일정하여야 한다. 따라서 유도된 매개변수의 변동성은 모형의 정도를 판단하는 중요한 척도이다. 매개변수의 변동성은 변동계수로 측정되며 대상유역에서의 매개변수 K에 대한 변동계수는 표 3과 같다.

Clark 모형의 매개변수 C, K와 유역면적과 상관관계를 알아보기 위하여 회귀분석을 실시하였다. 유역평균 매개변수 C, K와 유역면적을 전대수지에 도시하면 그림 2와 3과 같으며, 회귀식은 식 (4) 및 (5)와 같다.

$$C = 2.17A^{0.17} \quad (4)$$

$$K = 3.92A^{0.06} \quad (5)$$

4.2 Nash 모형

Nash(1957, 1960)는 전유역이 일련의 동일한 선형저수지로 구성되어 있는 개념적 모형을 제안하였으며 각 저수지에 대한 저류량 S와 유출량 Q는 선형 관계를 가진다고 가정하여 유출해석을 실시하였다. Nash 모형의 개념도는 그림 4와 같다. Nash 모형은 일련의 n개 선형저수지에 순간 단위 유효우량이 유역에 내릴 경우 첫번째 저수지가 순간적으로 만수되어 두번째 저수지로 유출되고, 두번째 저수지로부터 세번째 저수지로 유출되며 마지막 n번째 저수지를 통과한 유출량을 구하는 것으로서, n 번째 저수지의 유출량 즉, 전체 유역으로부터의 유출량은 식 (6)과 같다.

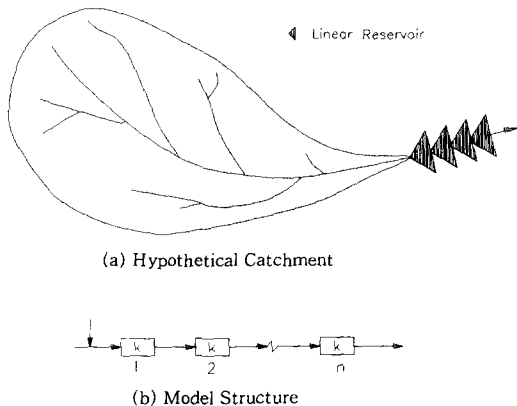


그림 4. 가상유역과 모형구조(Nash 모형)

표 4. Nash 모형의 매개변수

유역명	유역평균 매개변수		k의 변동계수
	n	k	
무성	2	4.07	0.218
병천	2	3.88	0.208
미성	2	3.52	0.191
고노	2	3.43	0.202
동곡	2	3.06	0.195
효령	2	3.46	0.248
평균	-	-	0.210

$$Q_n(t) = \frac{1}{k \Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-t/k} \quad (6)$$

여기서 k는 저류상수, $\Gamma(n)$ 은 n의 Gamma 함수이며, 식 (6)은 n 개의 선형저수지를 통해 추적하여 얻은 순간단위도의 종거를 나타낸다. Nash 모형에서의 매개변수는 선형저수지의 갯수 n과 저류상수 k이다. 매개변수 n과 k의 결정을 위하여 일반적으로 모멘트법이 이용되고 있다. 본 연구에서는 Nash 모형의 유역평균 매개변수를 구하기 위하여 모멘트법으로 구한 각 유역의 평균 n값의 정수를 택하였으며, 이를 Nash 모형에 적용시켜 합성수문곡선의 침두유량이 실측수문곡선의 침두유량과 가장 일치되는 k값을 최적매개변수로 결정하고, 최적매개변수 평균값을 유역평균 매개변수로 택하였다. 이들 유역평균 매개변수는 표 4에 나타내었다.

대상유역의 모든 호우사상에 대하여 유도된 매개변수 k의 변동계수를 계산하였으며, 이를 표 4에 나타내었다. 표 4에서 보면 전 유역에서의 변동계수는 0.210으로 Clark 모형과 비슷한 결과를 보이고 있다. 6개 유역을 비교하여 보면 효령유역에서 변동성이 제일 크며, 미성유역에서 변동성이 작게 나타났다.

Nash 모형의 매개변수 n은 유역의 크기에 관계없이 일정한 값을 나타내고 있으며, 매개변수 k는 유역의 크기에 따라 변화하고 있다. 따라서 매개변수 k와 유역면적과의 상관관계를 알아보기 위하여 회귀분석을 실시하였으며, 또한 실측수문곡선의 침두유량과 일치시켜 결정된 매개변수 n과 k의 곱인 지체시간과 유역면적에 회귀분석을 실시하였다. Nash 모형의 매개변수 k와 유역면적 그리고 지체시간 nk와 유역면적을 전대수지에 도시하면 그림 5와 6과 같으며, 회귀식은 식 (7) 및 (8)과 같다.

$$k = 2.06A^{0.11} \quad (7)$$

$$nk = 4.11A^{0.11} \quad (8)$$

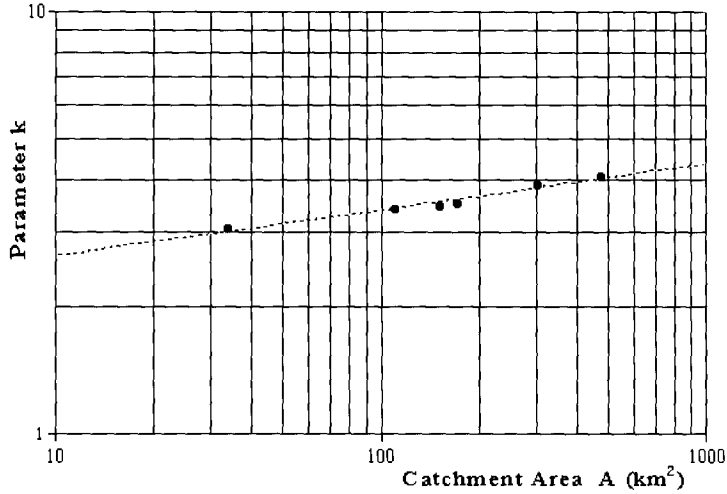


그림 5. 유역평균 매개변수 k와 유역면적과의 (Nash 모형)

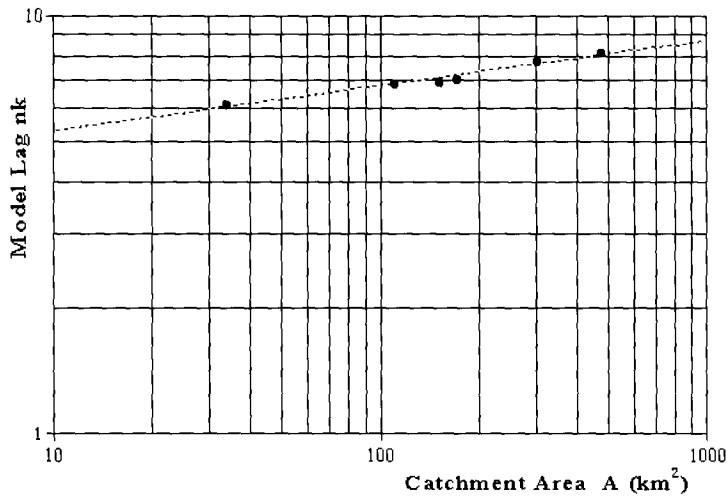


그림 6. 지체시간 nk와 유역면적과의 관계 (Nash 모형)

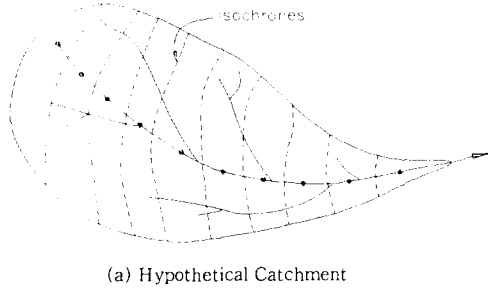
5. 비선형 개념적 모형

$$K = kQ^m \quad (9)$$

5.1 Laurenson 모형

Laurenson(1962)에 의해 제안된 Laurenson 모형은 유역을 등도달시간에 의해 10개의 소유역으로 분할한다. 각 소유역의 중심에 절점이 위치하며 유입수문 곡선이 절점에 집중되는 것으로 가정한다. 각 소유역간에는 비선형 저류요소(저수지)에 대하여 적용된 추적방정식을 사용하며, Laurenson 모형에서의 비선형 저류상수 K는 식 (9)와 같다.

유역은 일련으로 연결된 10개의 비선형 저류요소로 구성되며, 가상유역과 모형의 구조는 그림 7과 같다. 전 유역 도달시간은 10개의 등도달시간으로 나뉘어지며, 최하류측 요소를 제외한 각 요소에서의 평균 도달시간은 전체 도달시간의 0.1이며, 최하류측인 경우 전체 도달시간의 0.05이다. 각 저류요소에서의 도달시간은 유로연장에 비례하며, 유로경사의 1/2승에 반비례한다. 이에 따라서 작성한 10개의 등도달시간에 의해 작성한



(a) Hypothetical Catchment



(b) Model Structure

그림 7. 가상유역과 모형구(Laurenson모형)

시간면적도의 중심은 평균 도달시간으로 나타낼 수 있으며 식 (10)과 같다.

$$\tau_m = \frac{\int_A \tau da}{\int_A da} = \frac{1}{A} \int_A \tau da \quad (10)$$

여기서 τ_m 은 평균도달시간, τ 는 각 요소에서의 도달시간, A 는 유역면적이다. 평균 도달시간이 지체시간과 일치하므로 식 (9)의 비선형 저류상수를 이용하면 각 요소에서의 저류상수는 식 (11)과 같다.

$$K_i = \frac{\Delta\tau k Q^m}{\tau_m} \quad (11)$$

여기서 $\Delta\tau$ 는 도달시간 간격이다. 최원점 소유역에서 발생하는 유효강우는 최원점 저류요소를 통하여 추적된다. 이 저류요소에서의 직접유출은 두번째 소유역의 유효강우와 합산이 되며, 합산된 유출은 두번째 저류요소를 통하여 추적이 된다. 이와 같은 과정이 유역의 출구까지 반복되며, 각 저류요소를 통한 저류 추적은 저류방정식을 이용한다. Laurenson 모형의 구조는 Nash 모형과 같이 입력, 출력만이 고려되도록 제한되기 보다는 유역의 내부특성을 포함하며, 유역특성의 공간변화와 비선형성이 고려된다. Laurenson 모형은 저류요소의 수 n , 저류량과 유출량 관계에서의 저류상수 k 와 지수 m 등 3개의 매개변수를 포함한다. 모형구조는 $n = 10$ 으로 고정되어 있기 때문에 모형은 2개의 매개변수를 갖는다.

식 (9)의 저류상수를 결정하기 위하여 지체시간과 평균유량과의 회귀식을 이용하였으며, 본 연구에서는

표 5. Laurenson 모형의 매개변수

유역명	유역평균 매개변수 k	k 의 변동계수
무성	6.04	0.161
병천	4.73	0.166
미성	4.17	0.172
고노	3.57	0.162
동곡	2.85	0.149
효령	3.77	0.181
평균	-	0.165

평균값인 $m = -0.27$ 을 택하였다. $n = 10$ 과 $m = -0.27$ 의 매개변수를 택하면 모형은 한개의 매개변수를 갖게 된다. 매개변수 k 는 실측수문곡선의 침투유량과 합성수문곡선의 침투유량이 일치될 때의 값을 택하였다. 본 연구의 대상유역인 위천의 6개 유역의 55개 호우사상으로부터 매개변수 k 를 결정하였으며, 유역평균 매개변수는 모든 호우사상으로부터 계산된 k 값의 평균치로 결정되었으며, 각 유역에서의 유역평균 매개변수는 표 5와 같다. 서로 다른 호우사상으로부터 결정된 매개변수 k 의 변동은 변동계수로 나타낼 수 있으며, 이는 표 5와 같다. 표 3 및 4와 비교하여 보면 Laurenson 모형에서의 변동성은 감소되었음을 알 수 있으며, 이는 모형에서의 비선형응답이 고려되어진 결과로 생각된다. 표 5를 살펴 보면 효령유역에서 매개변수의 변동성이 가장 크게 나타났으며, 동곡유역에서 가장 작게 나타남을 알 수 있다.

Laurenson 모형의 매개변수 k 와 유역면적과의 상관관계를 알아보기 위하여 회귀분석을 실시하였다. 매개변수 k 와 유역면적을 전대수지에 도시하면 그림 8과 같으며, 회귀식은 식 (12)와 같다.

$$k = 1.03A^{0.27} \quad (12)$$

5.2 WBN 모형

Boyd 등(1979)과 Boyd 등(1987)이 제안한 WBN 모형은 유역의 수문학적 특성과 지형학적 특성을 이용하여 수문곡선을 합성하는 모형이다. WBN 모형은 유역을 여러개의 소유역으로 분할하며, 이를 강우의 흐름 경로에 따라 외부소유역과 내부소유역으로 나눈다. 외부소유역은 유역의 경계대로 흐름이 발생하지 않으며, 각각의 외부소유역에서 발생한 유효강우는 외부소유역의 출구에서 직접유출로 변환된다. 내부소유역은 상류측 유역에서 유출되는 강우가 내부소유역의 하천으로 흐르게 되며, 각각의 내부소유역에서의

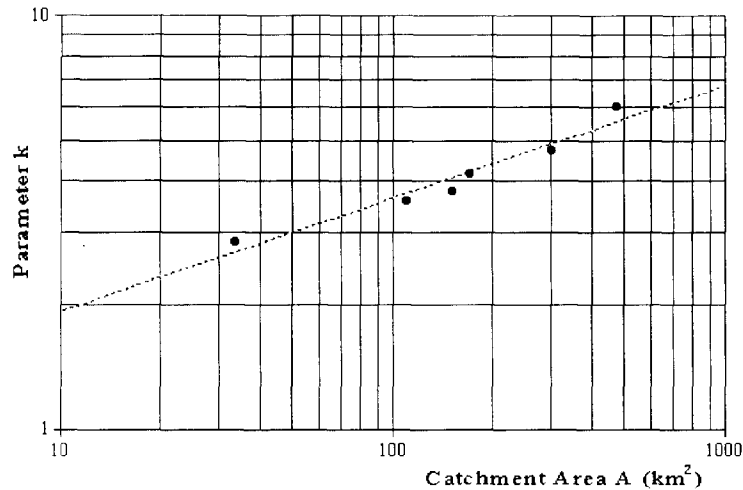


그림 8. 유역평균 매개변수 k 와유역면적과의 관계(Laurensonah모형)

유출은 상류측 소유역에서 전달되는 유출과 내부 소유역에서 발생한 강우를 외부소유역에서와 같은 방법에 의하여 변환된 유출로 구성된다. 따라서 WBN 모형은 유효강우에서 유출로의 변환에 의한 저류효과와 상류측 유출의 전달에 의한 저류효과를 포함하게 된다. 외부소유역과 내부소유역에서 서로 다른 저류효과를 나타내는 것이 기존의 다른 개념적 모형과의 차이점이다. 그림 9는 가상적인 유역과 유역의 수로망을 도시하였다.

WBN 모형의 각 소유역은 집중저류로 표현되며, 수로망에서 인접한 소유역의 다른 저류와 연결된다.

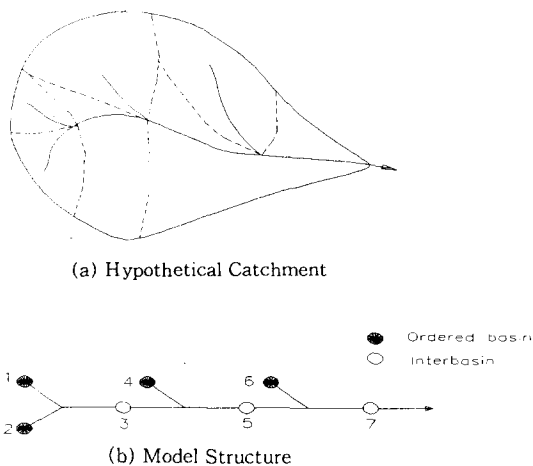


그림 9. 가상유역과 모형구조 (WBN 모형)

외부소유역과 내부소유역에서 외부소유역의 저류는 지표면지체시간 K_B 로 나타내며 유효강우 입력을 그 유역의 출구에서 직접유출수문곡선으로 변환시킨다. 그러나 내부소유역에서의 내부소유역의 저류는 이동 지체시간 K_i 로 나타내며, 상류측 수로에서의 유입수 문곡선을 하류로 이동시킨다. 내부소유역에서 유효강우로부터 변환된 유출은 지표면 유출에서의 저류효과를 가지므로 수로를 통하여 이동되는 상류측 흐름과는 독립적이 된다.

WBN 모형에서 저류는 저류상수 또는 시간으로 나타내며, 유역에서 유출수문곡선으로부터 추적한 시간과 관계되어진다. 직접유출수문곡선의 중심에서 유효강우의 중심까지의 시간으로 정의되는 지체시간은 WBN 모형에서 널리 이용되며 이는 유역의 모든 지점에서 출구까지 지표면 유출의 평균도달시간으로 나타난다. 비선형 저류에서의 저류상수를 결정하기 위하여 지체시간과 Askew(1968)가 제안한 가중평균 유량과의 관계식 (3)을 이용하였다. 본 연구에서는 지수 b 를 일정한 값으로 보았으며, 지수 b 는 위천의 6개 유역의 평균값인 -0.27 로 택하였다. 지수 b 를 -0.27 값으로 고정하고 위천의 6개 유역에서 지체시간과 가중평균유량과의 회귀분석을 실시하여 식 (3)의 회귀계수 a 의 값을 구하였다. 지체시간의 크기는 유역면적과 밀접한 관계가 있으므로 회귀분석으로부터 구한 회귀계수 a 와 유역면적 A 간의 회귀분석을 실시하였으며 회귀식은 식 (13)과 같다.

$$a = 3.56A^{0.36} \quad (13)$$

식 (13)과 지수 $b = -0.27$ 을 이용하여 비선형 저류에서의 유역지체시간을 유역의 크기와 가중평균유량으로 식 (14)와 같이 나타내었다.

$$\text{Lag} = 3.56A^{0.36} Q_{wm}^{-0.27} \quad (14)$$

식 (14)의 지수 값들은 비선형 저류에서의 지표면지체시간 K_B 와 이동지체시간 K_i 를 추정하기 위한 관계식을 위하여 채택하였으며, 지표면지체시간 K_B 와 이동지체시간 K_i 의 상대적 크기를 나타내기 위하여 이정식 등 (1996)이 위천유역에서 제시한 K_B 에 대한 K_i 의 비 0.12를 택하였다. 비선형 저류에서의 지표면지체시간 K_B 와 이동지체시간 K_i 를 구하는 관계식은 식 (15) 및 (16)과 같다.

$$K_B = CA^{0.36} Q^{-0.27} \quad (15)$$

$$K_i = 0.12CA^{0.36} Q^{-0.27} \quad (16)$$

여기서 C 는 실측수문곡선과 합성수문곡선으로 부터 최적화에 의해 계산되는 매개변수이다.

비선형 저류상수를 구하는 관계식의 매개변수 C 의 산정을 위하여 비선형 WBN 모형을 위천의 6개 유역에 적용하였다. 식 (15)와 (16)을 이용하여 각 호우사상의 첨두유량과 일치하도록 모형의 매개변수 C 의 최적값을 결정하였다. 비선형 WBN 모형에서 조정되는 매개변수는 C 값이며, 나머지 매개변수는 유역의 구조 또는 유역응답의 실측치에 의하여 고정된다. 각 유역에서 평균매개변수 C 는 각 호우사상에서 구한 매개변수의 평균값을 택하였으며, 이의 결과는 표 6과 같다. 표 6으로부터 WBN 모형의 매개변수 C 는 다른 개념적 모형과 달리 유역의 크기와 관계없이 일정하게 나타나고 있다. 이는 저류상수를 구하는 관계식에 유역면적의 크기가 고려되기 때문으로 생각된다. 각 호우사상으로부터

표 6. WBN 모형의 매개변수

유역명	유역평균 매개변수 C	C의 변동계수
무성	4.75	0.153
병천	4.61	0.156
미성	4.50	0.157
고노	4.56	0.164
동곡	4.84	0.143
효령	4.42	0.196
평균	4.61	0.162

매개변수의 변동성을 나타내고자 변동계수를 구하였으며 이는 표 6과 같다. 표 6을 선형 모형의 변동계수와 비교하여 보면 변동계수 값이 감소함을 알 수 있으며, 표 5의 Laurenson 모형의 변동계수와는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 WBN 모형과 Laurenson 모형에서 비선형 응답이 고려되었기 때문이며, 따라서 선형 모형에 비해 매개변수의 변동성이 작은 것으로 생각된다. WBN 모형에서 매개변수의 변동성은 Laurenson 모형의 결과 같이 동곡유역에서 가장 작으며, 효령유역에서 크게 나타났다.

6. 수문곡선 합성

선형 모형인 Clark 모형은 표 3의 유역평균 매개변수 C 를 이용하여 시간 면적도를 작성하였으며, 유역평균 매개변수 K 를 통하여 추적을 실시하였다. 이로부터 얻어진 순간단위도를 1시간 단위도로 변환시킨 후 각 호우사상의 유효유량을 이용하여 수문곡선을 합성하였으며, Nash 모형은 표 4의 유역평균 매개변수와 식 (6)으로부터 대상유역에서의 순간단위도를 구하였으며, 이를 1시간 단위도로 변환시킨 후 각 호우사상의 유효강우로부터 수문곡선을 합성하였다.

비선형 모형인 Laurenson 모형은 표 5의 유역평균 매개변수를 이용하여 유출수문곡선을 합성하였으며, WBN 모형은 각 유역에서 산정된 표 6의 유역평균 매개변수를 이용하여 유출수문곡선을 합성하였다. 각 유역에서의 첨두유량과 첨두시간의 오차를 비교하기 위하여 평균절대오차를 식 (17) 및 (18)과 같이 계산하였으며, 그 결과를 표 7에 나타내었다.

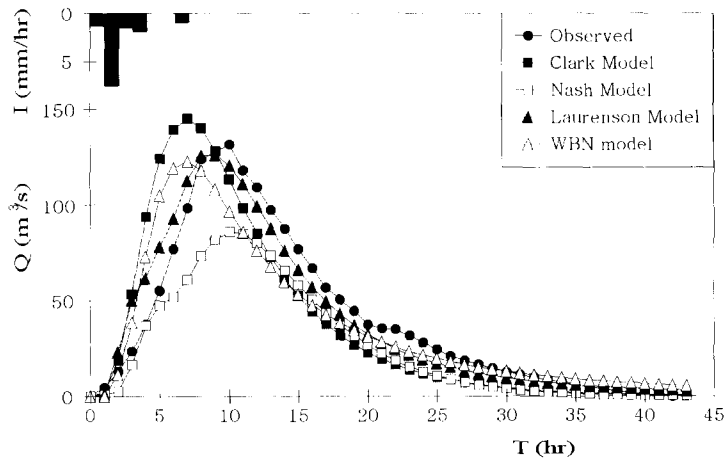
$$Q_p' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{psi} - Q_{pi}}{Q_{pi}} \right| \quad (17)$$

$$T_p' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{T_{psi} - T_{pi}}{T_{pi}} \right| \quad (18)$$

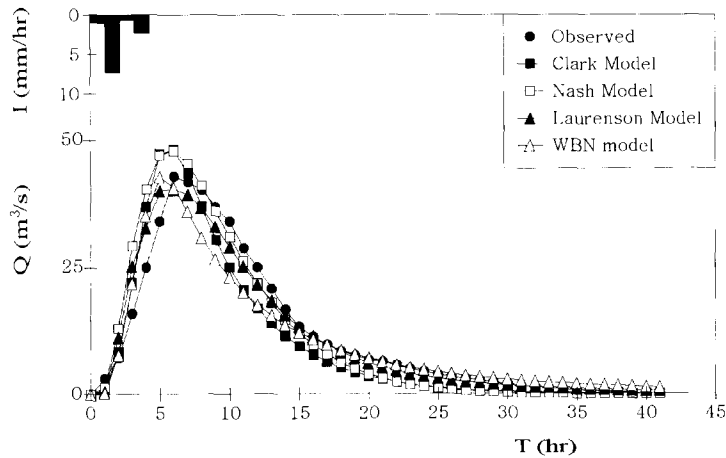
여기서 Q_{psi} 는 각 호우사상에 대한 합성수문곡선의 첨두유량, Q_{pi} 는 실측수문곡선의 첨두유량, T_{psi} 는 합성수문곡선의 첨두시간, T_{pi} 는 실측수문곡선의 첨두시간이며, N 은 호우사상의 갯수이다. 표 7을 살펴보면 첨두유량의 오차는 적용된 4가지 모형들 간에 커다란 차이를 찾아볼 수 없으나 첨두시간의 오차의 경우 선형 모형이 비선형 모형에 비해 다소 오차가 크게 나타남을 알 수 있다. 그럼 10은 4가지 개념적 모형에 의하여 합성된 수문곡선들과 실측수문곡선을 도시한 것이며, 그림 10에서도 표 7의 결과와 같이 비선형 모형인 Laurenson

표 7. 합성수문곡선의 오차

구 요 요	Clark 모형		Nash 모형		Laurenson 모형		WBN 모형	
	Q_p'	T_p'	Q_p'	T_p'	Q_p'	T_p'	Q_p'	T_p'
구 요 요	0.134	0.187	0.140	0.192	0.173	0.193	0.160	0.177
	0.140	0.205	0.138	0.218	0.167	0.202	0.162	0.182
구 요 요	0.143	0.236	0.157	0.253	0.146	0.172	0.184	0.198
	0.210	0.326	0.228	0.361	0.163	0.186	0.162	0.185
구 요 요	0.115	0.160	0.138	0.189	0.150	0.172	0.139	0.167
	0.194	0.331	0.199	0.351	0.167	0.199	0.143	0.190
구 요 요	0.156	0.241	0.167	0.261	0.161	0.187	0.158	0.183



(a) 1989년 7월 11일 호우사상(무성)



(b) 1989년 7월 11일 호우사상(효령)

그림 10. 합성수문곡선과 실측수문곡선의 비교

모형과 WBN 모형이 선형 모형인 Clark 모형과 Nash 모형에 비하여 상대적으로 수문곡선의 재현성이 우수함을 알 수 있다.

7. 개념적 모형의 종합평가

침투유량과 침투시간에 대한 절대오차를 통해 분석한 4가지 개념적 모형의 적합성 정도를 살펴보면, 모형들간의 상대적인 근소한 우열성을 감지할 수는 있으나, 특정모형 하나 또는 그 이상의 모형들이 호우사상별 해석에 바탕을 둔 결과들과 비교해 볼 때 나쁘게 수행되었는지 그렇지 않은지에 대해서는 명확히 보여주고 있지 못하다. 따라서 본 연구에서는 4가지 개념적 모형이 동일한 모집단에서 추출되었다고 간주할 수 있는 표본자료를 산출시키기를 검정하기 위하여 비모수 검정 방법인 순위검정에 의한 Friedman의 이원분산분석(Two-Way ANOVA)을 이용하였다(Siegel, 1956).

각 유역에 대해 3가지 기준을 통하여 분리검정을 시행하였으며, 첫번째 기준은 침투유량에 대한 상대오차(Relative Error, RE)로 상대오차는 식 (19)로 정의된다.

$$RE = \frac{Q_{ps} - Q_p}{Q_p} \quad (19)$$

여기서 Q_{ps} 는 주어진 호우사상에 대한 합성수문곡선의 침투유량이며, Q_p 는 실측수문곡선의 침투유량이다. 두번째 기준은 유출수문곡선의 형상에 대한 평가기준으로 누가자승오차(Integral Squared Error, ISE)이며, 누가자승오차는 식 (20)으로 정의된다.

$$ISE = \frac{F_1^{1/2}}{\sum_{i=1}^N Q_{oi}} \quad (20)$$

$$F_1 = \sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{si})^2 \quad (21)$$

여기서 Q_{oi} 는 실측유량, Q_{si} 는 합성유량, N 은 주어진 호우사상에 대한 유출수문곡선의 종거수이며, F_1 은 목적 함수이다. 세번째 기준은 가중누가자승오차(Weighted Integral Squared Error, WISE)로 식 (22)와 같이 정의되며, 누가자승오차를 침투유량에 대한 가중치를 고려하여 산정한 값으로 표현된다.

$$WISE = \frac{F_2^{1/2}}{\sum_{i=1}^N Q_{oi}} \quad (22)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{si})^2 \cdot \frac{Q_{oi}}{Q_p} \quad (23)$$

여기서 Q_p 는 실측수문곡선의 침투유량이며, F_2 는 목적 함수이다.

Friedman 검정을 하기 위하여 각 유역에 대한 수문곡선의 3가지 오차를 N 행과 M 열을 갖는 이원배치표를 만들었으며, 여기서 N 은 각 유역에 대한 검정사상의 수이며, M 은 비교되어지는 모형의 수로서 여기서는 $M=4$ 이다. 이 때 RE, ISE, WISE 값들은 가장 작은 오차를 갖는 것이 1순위가 되며 1에서 4까지 순위가 매겨져 검정통계량을 구하게 된다.

위천의 6개 유역에 대한 Friedman의 검정결과를 수록하면 표 8과 같다. 표 8에서 R_j 는 j 번째 모형의 순위함을 나타내며 χ_r^2 은 검정통계량이며, 5%의 유의수준하에서의 χ_r^2 의 한계치는 $\chi_{0.95,3}^2=7.81$ 이다(윤용남, 1986). 표 8에서 무성유역은 상대오차, 누가자승오차, 가중누가자승오차에 대한 검정통계량이 모두 5%의 유의수준하에서의 χ_r^2 의 한계치 $\chi_{0.95,3}^2=7.81$ 보다 작으므로 귀무가설이 인정됨을 알 수 있으며, 즉 이는 4개의 개념적 모형의 결과가 무성유역에서는 통계학적으로 볼 때 동일한 모집단에 속함을 의미한다. ISE와 WISE의 순위함을 보면 WBN 모형의 결과가 가장 작으므로 4개의 개념적 모형중 WBN 모형이 무성유역에서는 제일 좋은 결과를 산출하고 있다고 볼 수 있다.

병천유역의 경우 상대오차, 누가자승오차에 대한 검정통계량은 모두 5%의 유의수준하에서의 χ_r^2 의 한계치 $\chi_{0.95,3}^2=7.81$ 보다 작으므로 귀무가설이 인정됨을 알 수 있으나 가중누가자승오차에 대해서는 귀무가설이 기각되고 있다. 그러나 ISE와 WISE의 순위함을 보면 Laurensen 모형의 결과가 가장 작으므로 4개의 개념적 모형중 Laurensen 모형이 병천유역에서는 제일 좋은 결과를 산출하고 있다고 볼 수 있다.

미성유역은 상대오차, 누가자승오차, 가중누가자승오차에 대한 검정통계량이 모두 5%의 유의수준하에서의 χ_r^2 의 한계치 $\chi_{0.95,3}^2=7.81$ 보다 작으므로 귀무가설이 인정됨을 알 수 있으며, ISE와 WISE의 순위함을 보면 Laurensen 모형의 결과가 가장 작으므로 4개의 개념적 모형중 Laurensen 모형이 미성유역에서는 제일 좋은 결과를 산출하고 있다고 볼 수 있다.

고노유역은 상대오차에 대한 검정통계량은 5%의 유의수준하에서의 χ_r^2 의 한계치 $\chi_{0.95,3}^2=7.81$ 보다 작으므로 귀무가설이 인정됨을 알 수 있으나, 누가자승오차와 가중누가자승오차에 대해서는 모두 귀무가설이 기각되고 있다. 그러나 ISE와 WISE의 순위함을 보면 Laurensen 모형의 결과가 가장 작으므로 4개의 개념

표 8. Friedman의 이원분산분석에 의한 검정결과

유역명	오차	통계량	Clark 모형	Nash 모형	Laurenson 모형	WBN 모형
무성	RE	R_j	24	21	21	24
		χ_r^2	0.600			
	ISE	R_j	28	24	21	17
		χ_r^2	4.333			
	WISE	R_j	30	22	21	17
		χ_r^2	5.933			
병천	RE	R_j	23	22	22	23
		χ_r^2	0.067			
	ISE	R_j	28	25	14	23
		χ_r^2	7.267			
	WISE	R_j	28	25	13	24
		χ_r^2	8.600			
미성	RE	R_j	25	23	21	21
		χ_r^2	0.733			
	ISE	R_j	28	23	17	22
		χ_r^2	4.067			
	WISE	R_j	28	21	18	23
		χ_r^2	3.533			
고노	RE	R_j	22	25	21	22
		χ_r^2	0.600			
	ISE	R_j	30	25	14	21
		χ_r^2	9.133			
	WISE	R_j	30	25	15	20
		χ_r^2	8.333			
동곡	RE	R_j	28	30	20	22
		χ_r^2	4.080			
	ISE	R_j	28	31	19	22
		χ_r^2	5.400			
	WISE	R_j	30	29	20	21
		χ_r^2	4.920			
효령	RE	R_j	23	24	21	22
		χ_r^2	0.333			
	ISE	R_j	31	24	17	18
		χ_r^2	8.333			
	WISE	R_j	31	21	18	20
		χ_r^2	6.733			

적 모형중 Laurenson 모형이 고노유역에서는 제일 좋은 결과를 산출하고 있다고 볼 수 있다.

동곡유역은 상대오차, 누가자승오차, 가중누가자승 오차에 대한 검정통계량이 모두 5%의 유의 수준하에서의 χ_r^2 의 한계치 $\chi_{0.95,3}^2=7.81$ 보다 작으므로 귀무 가설이 인정됨을 알 수 있다. ISE와 WISE의 순위합

을 보면 Laurenson 모형의 결과가 가장 작으므로 4개의 개념적 모형중 Laurenson 모형이 동곡유역에서는 제일 좋은 결과를 산출하고 있다고 볼 수 있다.

효령유역은 상대오차, 누가자승오차, 가중누가자승 오차에 대한 검정통계량이 모두 5%의 유의 수준하에서의 χ_r^2 의 한계치 $\chi_{0.95,3}^2=7.81$ 보다 작으므로 귀무

가설이 인정됨을 알 수 있으나, 누가자승오차에 대해서는 귀무가설이 기각되고 있다. 그러나 ISE와 WISE의 순위합을 보면 Laurenson 모형의 결과가 가장 작으므로 4개의 개념적 모형중 Laurenson 모형이 효령유역에서는 제일 좋은 결과를 산출하고 있다고 볼 수 있다.

이상의 검토를 종합하여 보면 순위검정에 의한 Friedman의 이원분산분석 결과는 침투유량을 예측하기 위한 4가지 모형의 가능성간에는 모든 유역에서 어떤 유의한 차이를 나타내고 있지 않다. 그렇지만 유출수문곡선 전체를 재현하는 가능성간에는 고노유역에서 유의한 차이가 검출되고 있다. 또한 RE, ISE와 WISE의 순위합을 보면 4가지 모형에서 침투유량의 재현성의 차이점을 발견할 수 없으나 유출수문곡선 형상의 재현성에서는 약간의 차이가 검출되고 있다. 일반적으로 선형 모형인 Clark 모형과 Nash 모형의 ISE, WISE 값들이 비선형 모형인 Laurenson 모형과 WBN 모형에 비해 비교적 큼을 알 수 있으며, 이는 선형 모형들이 이들 유역에 대해서 실측수문곡선의 재현성이 Laurenson 모형이나 WBN 모형만큼 좋지 않음을 의미한다.

8. 결 론

본 연구에서는 중소하천 유역에서 강우-유출해석을 위한 정도 높은 개념적 모형을 결정하기 위하여 기존의 개념적 선형 모형인 Clark 모형, Nash 모형과 개념적 비선형 모형인 Laurenson 모형, WBN 모형을 위천 유역을 대상으로 적용 및 비교검토하였으며, 이로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 개념적 모형의 매개변수들을 실측수문곡선과의 적합에 의하여 결정하였으며, 이들 매개변수들은 유역특성인자와 높은 상관성을 보이고 있다.

2) 선형 모형에서 산정된 매개변수들의 변동성은 비선형 모형의 매개변수의 변동성보다 크게 나타났으며, 이는 비선형 모형에서 호우사상 크기에 따른 비선형 응답이 고려되었기 때문으로 생각된다.

3) 계측 유역에서 4개 개념적 모형으로부터 합성한 수문곡선을 분석한 결과 침투유량은 4개 모형간에 큰 차이가 없으나 침투시간은 비선형 모형인 Laurenson 모형과 WBN 모형이 선형 모형보다 적합도가 높은 것으로 나타났다.

4) 순위검정에 의한 Friedman의 이원분산분석 결과, 침투유량을 예측하기 위한 4가지 모형의 가능성간에는 모든 유역에서 어떤 유의한 차이를 나타내고 있지 않다. 그렇지만 유출수문곡선 전체를 재현하는 가능성

간에는 고노유역에서 유의한 차이가 검출되고 있으며, 비선형 모형들이 선형 모형들 보다 유출수문곡선 형상의 재현성에서 다소 우월한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 건설부 (1990~1992). 국제수문개발계획 (IHP) 대표 시험유역 연구보고서.
- 건설부 (1991). 수자원관리법 개발 연구조사 사업 보고서 별책부록 홍수수문 자료집.
- 윤용남 (1986). 공업수문학. 청문각.
- 이정식, 이재준, 이수경 (1996). "유출추적모형의 매개변수 추정에 관한 연구." 금오공과대학교 건설기술연구소논문집, 제3권, pp. 69-77.
- Askew, A.J. (1968). *Lag time of natural catchments*. Report No. 107, Univ. of New South Wales, Water Res. Lab.
- Boyd, M.J., Pilgrim, D.H., and Cordery, I. (1979). "A storage routing model based on catchment geomorphology." *Jr. of Hydrology*, Vol. 42, pp. 209-230.
- Boyd, M.J., Bates, B.C., Pilgrim, D.H., and Cordery, I. (1987). *WBNM : A general runoff routing model - Programs and manual*. Report No. 170. Univ. of New South Wales, Water Res. Lab.
- Clark, C.O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Transactions of ASCE*, Vol. 110, pp. 1014-1039.
- Laurenson, E.M. (1962). *Hydrograph synthesis by runoff routing*. Report No. 66. Univ. of New South Wales, Water Res. Lab.
- Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *International Association of Scientific Hydrology Publication* 45, pp. 114-121.
- Nash, J.E. (1960). "A unit hydrograph study with particular reference to British catchments." *Proc. Inst. Civil Engrs.*, Vol. 17, pp. 249-282.
- Siegel, S. (1956). *Nonparametric statistics for the behavioral sciences*. McGraw-Hill, New York.

(최종본 도착일 : 1997년 6월 7일)