

유역의 수문학적 유출 성분 분석과 활용 방안

이상진* · 황만하** · 고익환***

*한국수자원공사 수자원연구원 통합물관리연구단 선임연구원

**한국수자원공사 수자원연구원 통합물관리연구단 수석연구원

***한국수자원공사 수자원연구원 통합물관리연구단 연구소장



1. 서 언

최근 지구온난화와 기후변화로 증가하는 가뭄, 홍수, 태풍 등 수재해로 인한 피해와 손실로 인하여 물안보(Water Security)가 국가 위기관리차원의 주요 이슈로 대두되고 있다. 특히 증가하는 물 수요로 압박 받고 있는 우리나라의 경우 필요한 신규 수자원개발의 어려움과 물수요 증가에 따른 물 부족 및 수질 환경오염으로 인한 이해당사자간, 지역 간의 갈등·분쟁 등 물 문제 해결을 위한 정교한 기술개발 욕구는 지속적으로 증가할 것으로 전망 된다.

따라서 4계절이 뚜렷하고 이에 따른 홍수, 가뭄이 빈번한 기상수문 특성을 지니고 있는 우리나라에서는 유역의 한정된 수자원을 최대한 효율적으로 활용하는 관리방안을 마련하는 일은 매우 시급하고 중요하다. 이를 위해 우선적으로 댐과 같은 수공구조물이 있는 유역의 경우에는 유역관리 차원에서 정확한 유출량산정 등 신뢰성있는 기초 수문정보 제공이 선행되어야 한다.

유출유출관리를 위한 통상적인 방법중 하나는 주요지점의 관측유량을 유사하게 모의 가능하도록 강우-유출모형을 구축한 후, 해당 모형에서 제공하는 유출결과를 활용하는 것이다. 그러나 모형에 의한 유출결과는 단편적인 유출총량에 대해서만 검증된 결과이기 때문에 유출성분별 적정성 여부에 대한 의문이 남아있다. 따라서 유역의 효율적인 수자원관리 의사결정을 지원하기 위해서는 단순 유출모의 결

과 뿐만 아니라 신뢰성 있는 기저 및 직접유출에 관한 성분별 정보 제공이 이루어져야 한다.

본 고에서는 효율적인 유역의 유출관리 지원을 위해 유역의 유출성분 분석에 대한 기술동향을 검토하고 신뢰도있는 유역 유출성분의 활용 방안을 제시하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 다양한 유출성분 분석 방법중 분리주파수 결정기법을 활용하여 수문관측값의 유출성분을 분리하고, 선행연구에서 개발된 유역유출관리모형 수행결과와 비교·검증하였다. 이와 같이 유역유출관리모형을 활용하여 제공되는 유출성분별 수문정보는 향후 유역 관리 차원의 지표수·지하수 유출지표로 활용가능 할 것으로 판단된다.

2. 유역유출성분 분석 기술동향

유역의 유출성분을 분석하는 방법으로는 물수지 분석법, 해석적 방법, 유출수문곡선의 기저유출분석법, NRCS-CN(NRCS Curve-Number, 1969)방법 등이 있다. 물수지 분석법의 경우 이론은 명확하나 다양하고 복잡한 수문조건을 단순화하는 과정에서 오차가 발생할 수 있다. 해석적 방법은 해석에 요구되는 대상유역의 물리적 특성을 제대로 파악하여 반영하기 쉽지않고, 기저유출분석법은 기저유출 분리를 함에 있어서 연구자의 임의성이 개재되거나 자연상태를 반영할 수 있다. NRCS-CN방법은 토양의 피복상태와 토지 이용상태 및 선행강수량에 따라 유출율을 결정짓는 유출곡선지수를 산정하여 유출량을 분석하는 것으

로 최근 이 방법을 활용한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 박재성 등(1999)은 충북 초정 소유역을 대상으로 NRCS-CN방법 및 물수지분석법, 지하수위 강하곡선법, 유출수문곡선법으로 지하수량을 산정하여 비교·분석하였다. 정영훈(2000) 등은 미원면을 중심으로 NRCS-CN방법을 적용하여 지하수량을 산정하였다. 배상근 등(2006)은 IHP(국제수문개발계획)의 유역 중 위천유역과 평창강 유역내의 5개 소유역에 대하여 기저유출분리법으로부터 유출성분을 분리하고 이를 NRCS-CN방법으로 구한 지하수량과 비교하였다.

다른 방법으로 강우-유출의 상관관계가 강우지속시간, 유역특성에 따라 서로 다른 주파수를 갖고 발생한다는 점에 착안하여 수치필터를 이용한 기법을 활용하여 수문곡선을 직접 유출성분(주로 홍수성분)과 기저 유출성분(주로 지하수 침투 등으로 인해 유출시간이 홍수성분에 비해 상대적으로 긴 유출량) 등으로 분리하는 기법을 활용할 수 있다. 이것은 유출성분의 분리곡선과 커다란 차이를 나타내지 않지만 수평분리법이나 지하수 감수곡선을 고려한 방법과 같이 임의성을 배제할 수 있다는 점에 있어서 합리적인 방법이다. Lyne 등(1979)은 주파수필터를 이용하여 유출성분을 분리하는 Digital Filter 기법을 활용하여 유출성분을 분리하였으며, 한국건설기술연구원(2004)에서는 이 기법을 활용하여 유출량 관측자료로부터 지표수 유출량을 고주파 영역의 신호로, 지하수 유출량은 저주파수영역의 신호로 간주하여 유출성분을 분리하고 해당유역의 유출특성을 분석하였다. 이와 같이 다양한 방법을 통하여 지표 및 지하수의 유출성분을 분석하는 연구들이 진행되고 있으나 본 고에서는 분리주파수 결정기법에 의한 유출성분 분석에 초점을 맞추어 기술 하고자 한다.

관측된 수문곡선(저수지에서는 유입수문곡선)을 기저유출성분과 직접유출성분으로 분리하기 위하여 우선적으로 각 유출성분에 대응하는 강우와의 상관관계를 적절하게 분석해야 한다. 이를 위해서는 먼저 해당유역의 유출특성을 나타내는 분리주파수를 결정하여야 하므로 이를 위한 절차로 먼저 시계열에 포함된 몇 개의 홍수의 감쇠기에 대해서 그 유량의 대수 $\ln Q$ 를 시간에 대해 도시하고, 그래프에서 부분적으로 직선 구간으로 이루어진 부분은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = Q_0 e^{-t/T_c} \tag{1}$$

여기서 T_c 는 지하수감수곡선상의 도달시간으로 분리주파수 f_c 의 관계는 식(2)와 같다.

$$f_c = \frac{\delta}{2\pi} \frac{1}{T_c} \tag{2}$$

δ 는 분리 필터에 이용되는 감쇠계수이며 T_c 와 f_c 및 계수 c_0, c_1, δ 와의 관계는, 식(3)과 같다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{c_0}, \quad c_0 = (\delta/T_c)^2 \tag{3}$$

$\ln Q - t$ 의 그래프에는 지하감수곡선의 접선이 일반적으로 2~3개의 직선구간이 나타나며, 일단위의 유량-시간의 편대수 plot에서 T_c 를 결정하기에는 충분한 데이터를 얻을 수 없는 상태도 발생한다. 이 경우에는 자기 회귀계수에 의한 유출 분리법이 많이 활용되는데 이는 수문곡선의 분리를 위한 일유량 시계열을 자기회귀식으로 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$y_i = a_1 y_{i-1} + a_2 y_{i-2} \dots + a_p y_{i-p} + \epsilon_{i-1} \tag{4}$$

여기서, a_1, a_2, \dots, a_p 는 자기회귀 계수, ϵ_{i-1} 은 일강우 x_{i-1} 에 비례한 백색잡음(white noise)이다. 자기 회귀 계수는 현시각 $t (= i\Delta t)$ 의 유량이 그 이전 시각 $t - \Delta t, t - 2\Delta t, \dots, t - k\Delta t$ 의 유량에 영향을 주는 중첩이라고 생각된다. 따라서, 중첩 a_p 즉 자기회귀계수가 작아지게 되고, 그 이후의 계수를 무시할 수 있게 되는 시점($t = k\Delta t$)을 분리 일수 τ_s 로 정의할 수 있다. 또한 강우와 유출량과의 교차 상관 분석을 위하여 시간과 함께 변동하는 2개의 변량 x 와 y 의 상관성을 정량적으로 분석하는 교차상관(cross-correlation)함수 $C_{xy}(\tau)$ 를 사용하였으며 식(5)와 같다.

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t+\tau)dt \tag{5}$$

분리 주파수가 결정되면, 일 단위의 유량 데이터를 표면, 중간 유출, 지하수 유출로 유출 분리하는 것은 수치 필터로

가능하다. 주파수 특성, 즉 각 진동수의 변동을 어느 정도 통과시키는 범위는 식(6)에서 결정된다.

$$|W(f)|^2 = \frac{1}{\{1 - (f/f_c)^2\}^2 + \delta^2 (f/f_c)^2} \quad (6)$$

따라서, $|W(f)|$ 와 f 관계를 감쇄계수 δ 로 나타내는 것이 가능하고, $W(f)$ 의 fourier 변환식을 다시 쓰면 식(7)과 같다.

$$w(\tau) = \frac{c_0 \exp(-\frac{c_1}{2} \cdot \tau) \sinh \sqrt{(c_1 - \frac{1}{4 - c_0}) \tau}}{\sqrt{c_1^2/4 - c_0}} \quad (\tau \geq 0) \quad w(\tau) = 0 (\tau < 0) \quad (7)$$

이것은 이산화한 저주파 수치필터 $w(n)$ ($n=0,1,2,\dots$)로 원래의 유량 시계열을 통과할 때의 출력 $\tilde{y}(t)$ ($=y^{(1)}(t)$)이 식(8)과 같이 지하수 유출성분이 된다.

$$y^{(1)}(t) = \tilde{y}(t) = \alpha \sum w(n)y(t-n\Delta t) \quad (8)$$

여기서, 가중계수 α 는 원래 유량과 지하수 유출 성분과의 차(중간 표면유출성분) $y(2')(t)$ 가 음이 되지 않는 조건을 만족하도록 선택하며 식(9)를 만족하도록 한다.

$$y(2')(T) = y(t) - y(1)(t) \geq 0 \quad (9)$$

3. 유역에의 적용 방안

강우-유출 상관분석에 의한 유출성분을 산정하기 위하여 대청유역의 과거 18년간의 일강우량과 저수지 유입량을 취득하였다. 2000년 이후에는 용담댐 건설로 인하여 선형적인 강우-유출관계가 성립되지 않으므로 1983년~2000년 동안의 일자료로 한정하였다. 강우발생에 따른 호우사상을 선별하기 위하여 일별 강우자료로부터 유역평균강우량이 0.1 mm이상인 일은 강우일로, 그 미만은 무강우일로 설정하였다. 이러한 조건하에 분리된 호우수는 총 593개였으며, 최종 선정된 호우사상, 강우일수, 무강우일수, 초기유량, 강우량 각각의 평균, 분산 및 표준편차는 Table. 1과 같다.

최종 선정된 호우의 강우량별 지속기간, 강우량과 호우의 발생초기의 유량(초기유량), 강우량과 무강우기간, 초기유량과 무강우기간 등 유량별 유출율의 관계는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 선정 호우에서 호우의 지속기간은 대부분 1~14일까지이며, 대부분 유량이 0~50 cms의 범위내에서 발생하였다. 무강우기간과 초기 유량의 관계에서는 무강우기간이 길어질수록 초기유량의 크기가 지수함수적으로 감소하고 있음을 나타내고 있다.

Table 1 Mean, Variation, Standard deviation of Rain Day, No Rain Day, Initial Rain

Month	No. of Rainfall	Rain Day(day)			No Rain Day(day)			Initial Rain(CMS)			Rainfall(mm)		
		Mean	Var.	Sd.	Mean	Var.	Sd.	Mean	Var.	Sd.	Mean	Var.	Sd.
1	48	11.0	42.1	6.7	9.3	40.7	6.6	34.0	446.8	21.7	27.9	519.6	23.5
2	40	9.5	43.8	6.8	7.8	38.8	6.4	34.1	682.1	26.9	34.5	744.8	28.1
3	50	11.1	17.5	4.3	9.4	33.4	5.9	64.3	1764.0	43.2	52.7	493.3	22.9
4	56	11.0	29.7	5.6	10.5	13.9	3.8	107.9	9131.6	98.3	71.1	1643.2	41.7
5	57	12.1	16.9	4.2	11.9	29.4	5.6	77.1	2735.8	53.8	77.3	1447.4	39.1
6	66	20.4	108.5	10.7	12.5	21.5	4.8	82.0	8758.9	96.3	167.8	8061.5	92.4
7	54	21.1	91.0	9.8	6.7	12.6	3.6	171.0	17918.2	137.7	272.2	10184.4	103.8
8	49	18.6	91.3	9.8	6.1	11.0	3.4	131.9	18742.1	140.9	244.3	21581.1	151.2
9	40	8.7	28.7	5.5	6.4	14.5	3.9	127.1	16145.6	130.7	139.0	10107.8	103.5
10	43	9.6	20.9	4.7	12.2	31.5	5.8	57.1	3034.7	56.7	54.2	1426.8	38.9
11	49	11.9	48.7	7.2	9.1	23.3	5.0	47.1	870.6	30.4	46.7	1069.9	33.7
12	41	8.8	30.3	5.7	8.5	41.4	6.6	31.9	497.7	23.0	23.7	243.5	16.1

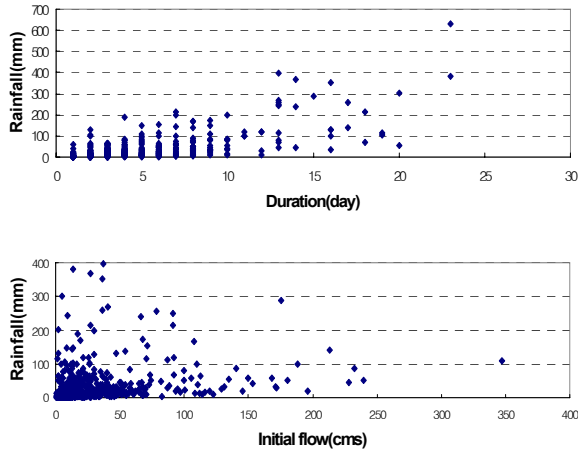


Fig. 1 Relation between Rainfall and Duration, Initial Rainfall

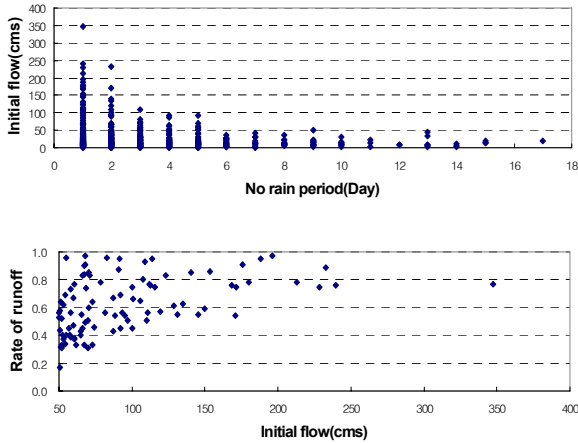


Fig. 2 Relation between No Rain day and Initial Rainfall, between Initial Rainfall and Runoff Rate

관측된 유출수문곡선에서 기저유출과 직접유출량을 분리하기 위하여 우선적으로 강우와 댐유입량의 상관관계를 분석한 결과 3일이내에서 강우에 따른 유출량은 강한 상관을 나타내고 있었으며, 부분적으로 4~9일, 9~14일 순으로 4~5일 간격으로 상관관계가 있는 것으로 분석되었다. 또한 FFT 분석결과 유량의 지체시간을 나타내는 τ 가 0.495로 산정된 것을 토대로 대청댐 유역의 감쇠계수 δ 와 수문곡선 감쇠부 주기인 T_c 를 각각 2.0 및 4.0일로 결정하여 저주파 필터를 구성하였다. 또한 복합호우를 구분하기 위해 최대 Lag를 90%까지 취하면 9일로 나타나 Lag 최대치는 9일로 결정하였다.

유출성분 분석 결과 Fig. 5(b)와 같이 기저 및 직접유출

의 유출을 결정계수는 각각 0.9124, 0.8932로 분석되었다. 전반적으로 년강우량이 900 mm정도 규모에서 유출량은 200~300 mm정도로 나타났으며, 이 강우량을 전후로 기저 및 직접유출량이 서로 역전되는 유출특성을 나타내었다. 즉 유출량이 200 mm 이상이 되면 유역의 습윤상태는 포화상태에 근접하게 되고, 따라서 지하로 침투하는 기저 유출량보다 상대적으로 직접유출량이 지배하는 상황으로 변한다는 것을 확인할 수 있다.

한편 분리주파수 결정에 의하여 산정된 유출성분의 검증을 위하여 같은기간동안의 유역유출모형 수행결과와 비교하였다. 개발된 유역유출관리모형은 미공병단(Corps of Engineers, 1956)에서 개발한 SSARR모형에 기반을 둔 것으로서 이상진(2006)과 류경식(2007) 등이 그 적용성을 검토한 바 있다. 본 분석에서 유역 적용을 위한 소유역 분할은 한국수자원공사가 관할하고 있는 본류 수위표지점인 동향, 천천, 수통, 호탄 및 옥천지점과 대청댐이 위치한 지점을 대상으로 Fig. 3과 같이 7개 소유역으로 분할하였다. Fig. 4는 유출 모의를 위한 대청유역 유출모식도를 나타낸 것이다.

Table 2와 Fig. 5(a)는 과거 18년간 모형에 의한 모의 결과를 직접유출과 기저유출로 구분하여 도시한 것이다. 년강우량이 1000 mm를 상회하면서 유출량은 200 mm 이상이 되어 직접유출량이 상대적으로 커지고 이를 전후로

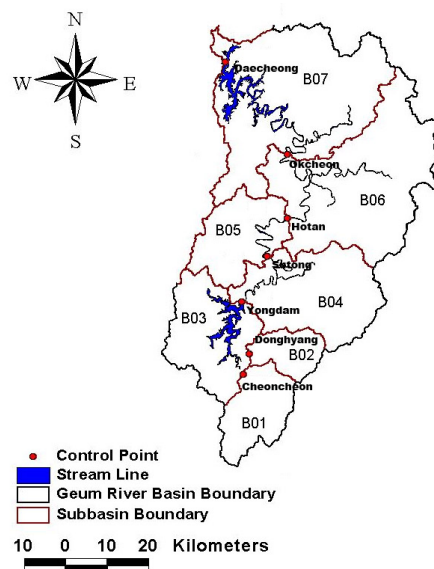


Fig. 3 Map of sub-basin in Daecheong Dam

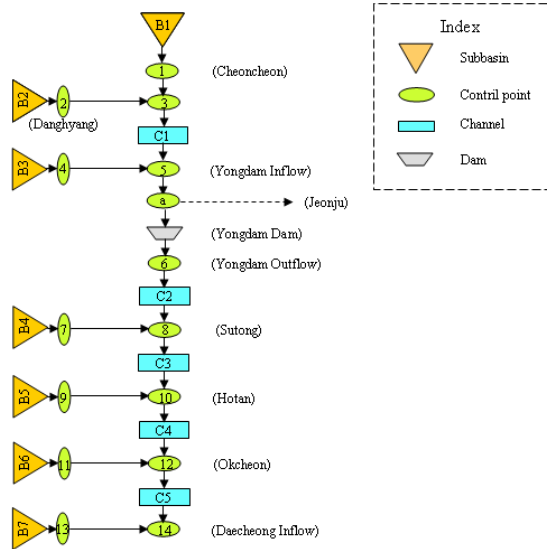
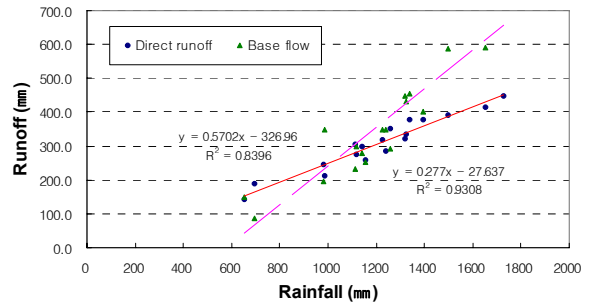


Fig. 4 Flowchart of rainfall-runoff model

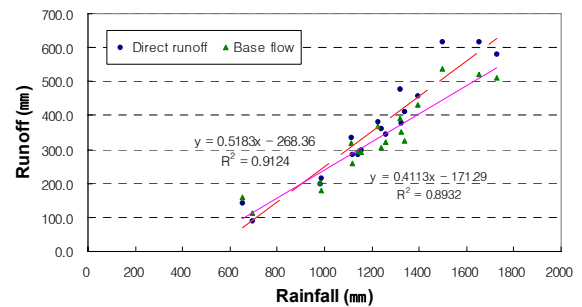
기저 및 직접유출량이 역전되는 양상을 나타내었는데 이것은 분리주파수 결정기법에 의하여 분석된 결과와 매우 근사한 것이다.

모형에 의한 유출성분 분석 결과의 검증을 위하여 분리주파수 기법을 활용하여 기저 및 직접유출량으로 분리된 관측값과 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 83년~2000년동안의 일 유출결과를 월별 산술합계를 토대로 결과 분석한 것으로 거의 근사하게 재현하고 있는 것으로 분석되었으며, 이를 계절별로 분석한 결과는 Fig. 7와 같다.

봄에 해당하는 3월~5월의 기저 및 직접유출량은 각각 200~300MCM와 400~500MCM정도였으며, 모형 모의결과는 주파수분리기법에 의한 성분분리 결과와 매우 근사하게 모의하는 것으로 분석되었다. 여름(6월~8월)은 홍수기로 기저 및 직접유출량은 각각 2,000~2,500 MCM와 1000~1,800MCM정도로 분석되었으며, 가을



(a) Runoff management model



(b) Separation of frequency

Fig. 5 Runoff Component Analysis by runoff management model and separation of frequency

에 해당되는 9월~11월의 기저 및 직접유출량은 각각 200~300MCM와 350~400MCM정도 유출되는 것으로 분석되었다. 반면 겨울(12월~2월)는 강우가 가장 부족한 계절로써 기저유출량은 200MCM이하로 적었으며, 직접유출량도 400MCM을 넘지 않는 범위내인 것으로 분석되었다.

4. 결 언

최근 수자원의 효율적 이용 및 관리문제는 국가경쟁력을 좌우하는 필수적인 요소로 대두되고 있으나 우리나라는 매년 홍수와 가뭄으로 인한 수재해가 반복되고 있음에도 주

Table 2 Runoff Component Analysis by RRFs in Dea-cheung Basin (Unit: MCM)

Year	Direct Flow	Base Flow	Year	Direct Flow	Base Flow	Year	Direct Flow	Base Flow
1983	1050.7	1086.6	1989	1807.2	1399.6	1995	1452.0	886.5
1984	1449.6	1187.1	1990	1457.9	1328.1	1996	1255.0	1150.3
1985	2469.4	1736.6	1991	1166.3	1245.2	1997	1904.3	1579.6
1986	966.3	1273.4	1992	820.9	1019.5	1998	3364.2	1872.4
1987	2460.8	1636.1	1993	1672.9	1577.9	1999	1214.8	1463.4
1988	626.3	593.4	1994	366.0	788.6	2000	1866.9	1346.8

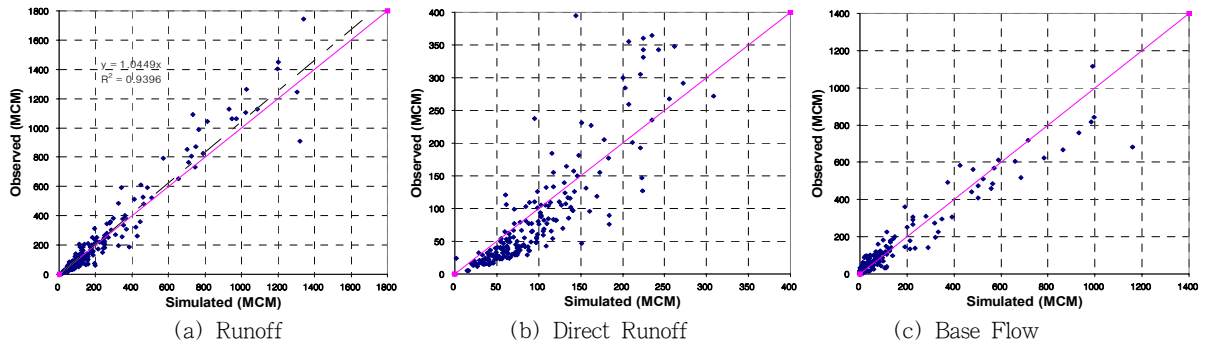


Fig. 6 Relation Between Simulated and Observed

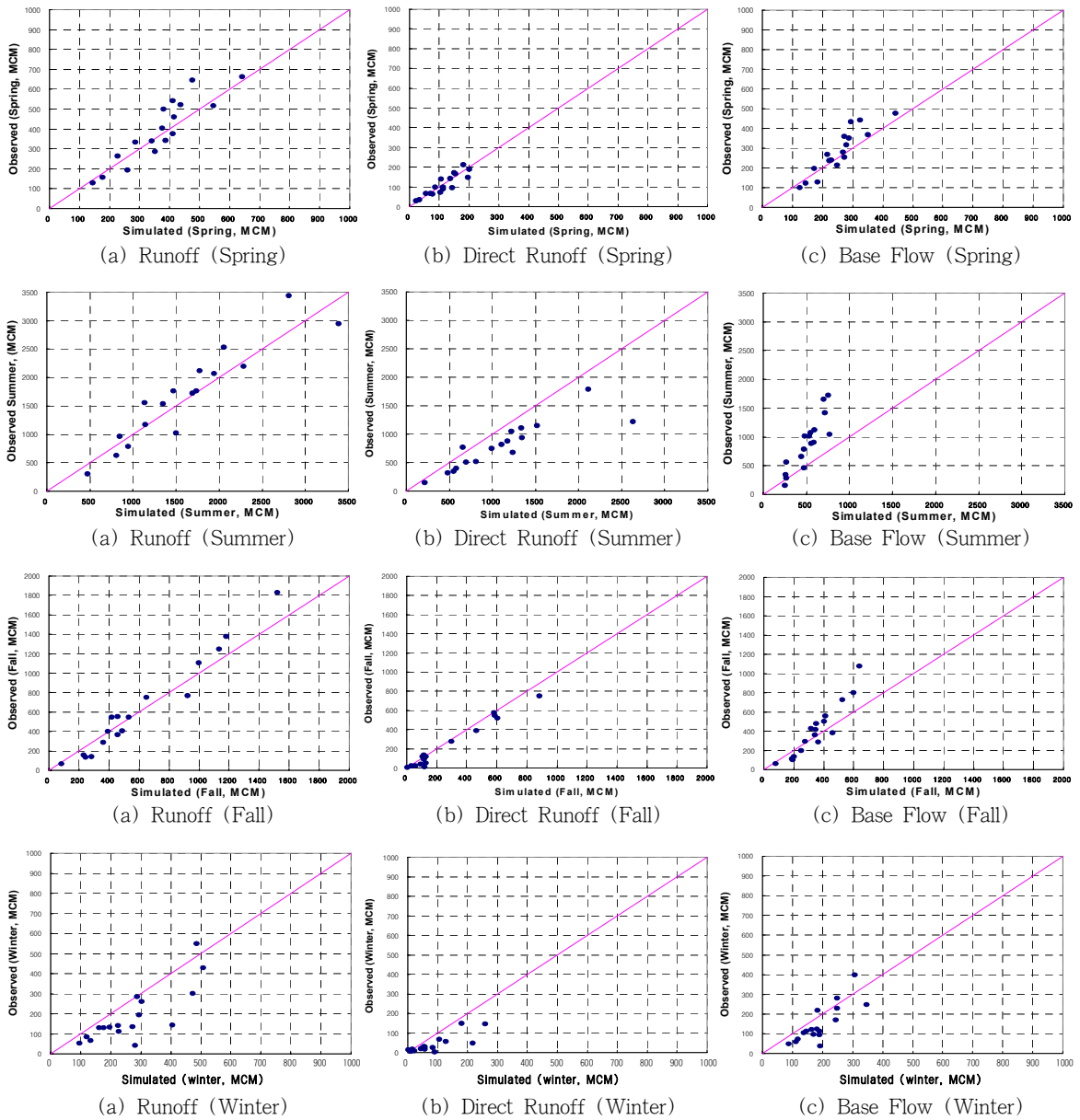


Fig. 7 Seasonal Runoff Component Relation Between Modeled and Observed

로 복구 중심의 사후대책으로 대응하고 있는 실정이다. 또한 하천 및 저수지 환경 관리, 홍수 및 가뭄피해 방지, 하천 운하 등 수자원관련 산업에 필요한 기술 수요는 날로 증대되고 있는 추세임을 감안하면 유역의 효율적인 물관리 체계를 구축하여 과학적인 유역관리기술을 조기에 정착시켜 나가는 것이 국가의 기술전략적 차원에서 매우 중요하다. 그러나 1990년대 이후 수자원의 효율적인 운영방안을 제시하기 위한 기초연구들이 시도되고 있으나 기술 활용도는 여전히 낮을 뿐만 아니라 기술의 지속적 적용 및 검증도 제대로 이루어지지 않고 있다. 이를 위해서는 우선적으로 유역관리 차원에서 유역내 주요지점의 신뢰도높은 상세 유출 정보제공이 필수적으로 요구된다.

본 고에서는 효율적인 유역의 유출관리를 위해 개발된 유역유출모형의 신뢰도 높은 수문정보 제공을 목적으로 대청유역을 중심으로 분리주파수 기법을 활용하여 수문관측 값을 기저 및 직접유출성분으로 분리하고, 기 개발된 모형의 유출성분 모의결과와 비교 분석하였다. 성분별 모의결과는 분리된 성분별 관측값과 매우 근사한 것으로 분석되었으며, 이를 활용하여 계절별로 기저유출량과 직접유출량 규모를 정량적으로 파악하였다. 이와 같이 유역유출관리모형을 활용하여 제공되는 유출성분별 수문정보는 향후 유역관리 차원의 지표수·지하수 유출지표로써 활용가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의지속적확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2000). 수자원장기종합계획 보고서.
2. 한국수자원공사 (2004a) 금강유역조사 보고서.
3. 한국수자원공사 (2004b) 대청다목적댐 관리연보.

4. USACE (1991). SSARR User manual. North Pacific Div., Portland.
5. 한국건설기술연구원, 지표수 수문성분 해석기술 개발 보고서, 과학기술부 (2004).
6. Arnold, J. G. and Allen, P. M., Validation of Automated Methods for Estimating Base Flow and Groundwater Recharge from Stream Flow Records, J. Am. Water Resour. Assoc., 35, pp. 411-424 (1999)
7. Lyne, V. and Hollick, M., Stochastic Time Variable Rainfall Runoff Modeling. Hydrology and Water Resources Symposium Berth, 1979, Proceedings, National Committee on Hydrology and Water Resources of the Institution of Engineers, Australia, pp. 89-92 (1979).
8. Nathan, R. J. and McMahon, A. T., Evaluation of Automated Techniques for Baseflow and Recession Analysis, Water Resour. Res., 26, pp. 1465-1473 (1990).
9. 박재성, 김경호, 전민우, 김지수 (1999). "소유역의 지하수 함양률 추정기법", 한국지하수환경학회지, 한국지하수환경학회, Vol. 6, No 2, pp. 76-86.
10. 정영훈, 김경호 (2000). "SCS-CN방법에 의한 미문면의 지하수 함양률 추정", 건설기술연구소 논문집, 충북대학교, Vol. 19, No. 2, pp. 181-190.
11. Soil Conservation Service (1969, 1971). "Hydrology" in SCS National Engineering Handbook, Section 4.
12. 『NRCS-CN방법과 기저유출 분리법을 이용한 지하수함양률 산정』 한국환경학회지 제15권 제3호 253~260, 2006
13. 이상진, 이배성, 류경식, 황만하 (2006). "유출모의를 위한 주요제어지점 유량특성분석", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제39권, 11호, pp. 905~914.
14. 류경식, 황만하, 맹승진, 이상진 (2007). "유역관리모형을 이용한 금강유역 유출특성 해석", 한국물환경학회논문집, 한국물환경학회, Vol. 23, No 4, pp. 527~534.