

기저유량의 감수특성에 관한 연구

(A Study on the Recession Characteristics of Base Flow)

이 동률*, 김 중훈**, 윤 용남**

1. 서 론

총래의 수자원 관리는 강수량이 풍부한 시기의 유출량에 집중되었으며, 무강우가 지속되는 갈수기의 유출량은 주된 관심의 대상이 아니었다. 이는 연유출량에서 갈수기 유출량의 비율이 작고, 홍수관리가 저수관리보다 중요했으며, 용수공급면에서 홍수기의 물을 저장하여 갈수기에 충분히 대처할 수 있었기 때문일 것이다. 그러나 최근 용수수요의 증가뿐만아니라 연중 고른 불수요, 댐과 같은 수자원 개발의 한계, 갈수기의 수질문제 및 발전계획 그리고 하천환경 등에서 발생하는 문제로 갈수시 유출량 부분은 수자원 관리에서 매우 중요한 요소가 되었다. 따라서 갈수시 유출특성 분석과 유출량 예측 등은 수문학에서 중요한 연구과제의 하나가 되었다.

이러한 상황에서 본 논문은 갈수량 예측, 지하수함양량 추정, 그리고 갈수시 용수공급량 추정 및 예측 등에 필요한 저수유출의 감수특성을 연구하고자 하였다. 우리나라 주요유역의 일 유출수문곡선에서 기저유량 감수부를 선정하였으며, 이들 감수부에 선형과 비선형 감수식을 적용하여 적정 감수식을 선정하였다. 또한 각 감수부의 감수특성을 비교분석하였으며, 감수특성의 수문·지형·지질학적 영향을 분석하였다.

1.1 기저유량 감수식

1) 선형 감수식

가장폭 넓게 사용되는 선형 감수식은 Boussinesq(1904, Hall, 1968)에 의해 식(2.1)와 같이 제시되었다.

$$Q = Q_0 \exp(-\alpha t) \quad (2.1)$$

Barnes(1939)는 식(2.1)를 식(2.2)과 같이 나타내었다.

$$Q = Q_0 K^t \quad (2.2)$$

식(2.1), (2.2)에서 Q_0 는 $t=0$ 일때 유량, α 는 저류지체요소로 시간차원을 갖는 상수, $K (= \exp(-\alpha))$ 는 무차원 감수상수이다.

Werner와 Sunquist(1951, Singh, 1969)과 高木(1961)은 피압대수층의 지하수유출 감수식으로 식(2.1)을 이론적으로 유도하였다. 高木(1961)은 식(2.1)의 α 를 피압대수층의 형상인자와 투수계수의 함수인 식(2.3)와 같이 제시하였다.

$$\alpha = \frac{fk'}{Fl} \quad (2.3)$$

여기서, f 는 피압대수층의 단위폭당 단면적, k' 는 투수계수, l 은 하천에서 지하수 분수계까지의 거리, F 는 피압대수층 상류단 탱크의 단위폭당 단면적이다. 따라서 α 는 이론적으로 유역에서 계절적으로 변화되지 않는 지형·지질요소에서만 지배되어 특정유역에서 계절적으로 변화되지 않고 거의 일정하다. 이와같은 연구는 유역에서 α 의 경험적 평가연구방향에서 수문·지형·지질학적인 평가로 전환하게 되었다.

2) 비선형 감수식

일반적인 비선형감수식은 식(2.4)과 같다(Hall, 1968).

$$Q = Q_0(1+\alpha t)^{-\frac{n}{1-n}} \quad (2.4)$$

* 정희원 : 고려대학교 토목환경공학과 대학원 박사과정

** 정희원 : 고려대학교 토목환경공학과 교수

여기서 a 는 감수상수이며, n 은 상수이다.

Horton(1933)은 감수특성이 다른 지하수 유역들로 이루어진 유역의 지하수 흐름을 식(2.5)과 같은 비선형식으로 나타냈다. 식(2.5)는 식(2.1)의 선형시간축을 비선형시간축으로 변환하여 유도된다(Hall, 1968).

$$Q = Q_0 \exp(-mt^n) \quad (2.5)$$

Narbe(1968)는 감수곡선의 경험적인 연구로 n 은 일정한 지형·지질학적인 특성을 나타내고, Q_0 , m 은 수문학적 요소(기후, 식생)의 함수라고 하였다. 그는 n 은 지질학적으로 다른 유역에 따라 변화한다는 것을 보였고, n 이 감소할수록 유역의 지류능(retension capacity)이 증가한다고 하였다. 식(2.5)에서 $n = 1$ 이면 이 식은 선형 감수식인 식(2.1)과 같다.

1.2 연구목적

본 연구는 지금까지 한정된 유역에서 분석되었던 저수유출의 감수특성에 대하여 우리나라 전국적 많은 하천유역에서 무강우기간의 저수유출 감수부에 대하여 종합적인 분석을 시도하였다. 이와같은 분석은 다음과 같은 목적으로 수행되었다.

- 1) 단일수문곡선의 감수부와 복합수문곡선의 감수부 비교
- 2) 감수부에 대한 선형과 비선형 감수식의 적합성 비교
- 3) 감수특성의 수문·지형·지질학적 영향 분석

2. 감수식의 적합성 비교

2.1 감수식의 선정

감수식의 선정은, 먼저 감수계수들은 경험적 방법에 의해 추정되지만 물리적인 의미를 갖는 식으로 선정하고자 하였다. 선형감수식은 일반적으로 가장 많이 이용되는 식(2.1)와 같은 식(2.2)를 이용하였다. 비선형감수식은 일반적으로 식(2.4)을 많이 이용하지만 선형감수식과 형태가 달라 각 계수들의 물리적인 상호평가에 어려운 점이 있다. 그러나 식(2.5)는 선형감수식(2.2)의 선형시간축을 비선형시간축으로 변형된 것으로 $n=1$ 일때는 동일하게 된다. 또한 이 비선형식의 각 계수들은 물리적인 의미를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 비선형 감수식으로 Horton(1933)이 제안한 식(2.5)를 선정하였다.

2.2 감수계수의 산정

감수식의 계수 K , m , n 의 산정은 최소자승법을 이용한다.

1) 선형감수식

식(2.2)은 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\ln Q = \ln Q_0 - t \ln K \quad (2.6)$$

식(2.6)은 반대수지의 횡축에 일단위 시간 t 를 취하고 종축에 유량 Q 를 취하면 직선으로 나타나며 기울기에서 감수계수 K 를 구할 수 있다.

2) 비선형감수식

식(2.5)는 식(2.7)과 같이 변형할 수 있다(Singh, 1992).

$$\ln[\ln(Q_0/Q)] = \ln m + n \ln t \quad (2.7)$$

식(2.7)은 전대수지의 횡축에 일단위 시간 t 를 취하고 종축에 유량 $\ln(Q_0/Q)$ 를 취하면 직선으로 나타나며 여기에서 계수 m , n 를 구할 수 있다. 계수 m 은 $n=1$ 일때 식(2.8)와 같다.

$$K = \exp(-m) \quad (2.8)$$

2.3 감수식의 적합성 평가

감수식의 적합성평가는 식(2.9)의 총유출량의 상대오차(T)와 식(2.10)의 일유량의 상대오차 평균치(R)이라는 2개의 평가방법을 이용한다(高橋,1983).

$$T = \frac{\sum_{t=1}^N Q_0(t) - \sum_{t=1}^N Q_c(t)}{\sum_{t=1}^N Q_0(t)} \quad (2.9)$$

$$R = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{|Q_0(t) - Q_c(t)|}{Q_0(t)}}{N} \quad (2.10)$$

여기서, t는 일단위시간, $Q_0(t)$ 는 t일째 실측유량 (m^3/s), $Q_c(t)$ 는 t일째 계산유량 (m^3/s), N은 감수일수(days)이다.

2.4 감수부 선정

하천의 유출량은 일반적으로 빠르게 유출하는 성분(quick flow, 지표면 유출과 빠른 중간유출)과 완만하게 지속적으로 유출하는 성분(slow flow, 늦은 중간유출과 지하수 유출)으로 구성된다(Chow,1964). 본 연구에서는 개념적으로 이들 유출성분들을 유출수분곡선에서 분리할 수 있다고 가정하였고, slow flow 성분을 기저유량으로 정의하였다. 기저유량 감수부는 각각 다음과 같이 두부분으로 선정하였다.

- 1) 단일수분곡선 감수부 : 각 호우에 의해 형성되는 수분곡선의 침투유량에서 수일 후의 감수부-N-day법-(그림 2.1의 A).
- 2) 복합수분곡선 감수부 : 복합호우가 발생할 경우 두번째 호우에 의한 수분곡선의 유량상승시점의 유량이 선행호우에 의한 수분곡선의 유량상승 시점보다 작은 감수부 (그림 2.1의 B).

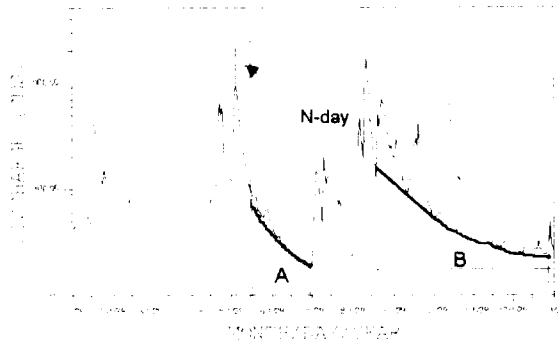


그림 2.1 감수부의 정의

1)은 감수부 연구에서 일반적으로 이용하는 방법이다. Horton(1933)은 상우강도가 침투능을 초과하면 지표면 유출이 발생하나 초기의 토양부족량(field moisture deficiency)이 총침투량보다 크면 지하수흐름에는 변화가 없고 유량상승시에도 감수는 계속된다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 복합강우에 의한 수분곡선이 2)와 같은 현상을 보일 때도 감수부를 선정하여 두 감수특성을 분석을 시도하였다.

2.5 대상유역 선정감수부

대상유역은 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강, 그리고 안성천이며 표 2.1에 자료기간, 단일수분곡선과 복합수분곡선에에서 선정한 감수부 자료수, 가정된 N-day를 수록하였다.

Linsley(1949)는 N-day를 약 26,000 Km^2 에서 6일, 1,200 Km^2 에서 3일을 제시하고있다.

표2.1 대상유역 및 선정 감수부 자료수

하천	지점	유역면적 (km ²)	자료기간	선정감수부 수		N-day
				단일	복합	
한강	고안	23607.9	1919-1940	189	39	6
	호명(가평)	10581.5	1923-1925	30	5	6
	청평	10455.5	1917-1940	181	49	6
	충주	6624.5	1917-1940	216	48	6
	동량(충주)	6412.5	1923-1926	30	5	6
	영춘	4787.7	1936-1940	48	9	4
	영월	4239.0	1979-1992	88	22	4
	팔괴(영월)	4216.5	1926-1935	90	27	4
	화천	4207.1	1936-1940	48	6	4
	인제	2080.1	1927-1928 1936-1940	70	9	4
	후포	1606.2	1975-1985	88	22	4
	정선	1460.1	1934-1940	67	14	4
	홍천	874.3	1963-1969	55	19	2
낙동강	진동	20311.3	1930-1940	87	15	6
			1958-1979	175	33	
	현풍	14000.9	1918-1940	216	34	6
			1965-1979	108	21	
	왜관	11074.4	1924-1940	137	34	6
			1959-1975	141	27	
	낙동	9369.0	1924-1940	128	29	6
			1958-1977	188	38	
정암	3283.0	1956-1969	149	29	4	
독산	2304.1	1923-1940	201	44	4	
		1953-1969	185	29		
합천	1042.0	1971-1982	128	30	4	
산청	745.9	1923-1932	93	21	2	
금강	규암	8261.0	1963-1979	139	35	6
	공주	7531.0	1966-1979	129	27	6
	옥천(안남)	3628.0	1923-1926	51	8	4
			1960-1970	136	23	
	무주	1555.2	1926-1932	79	19	4
용담	989.5	1963-1992	303	56	2	
섬진강	송정	4255.7	1917-1940	283	32	4
			1962-1979	183	29	
	압록	2447.5	1917-1940	326	53	4
			1958-1979	183	29	
적성	1350.8	1973-1979	72	17	4	
옥정	745.0	1923-1926	33	7	2	
영산강	나주	2058.0	1916-1940	260	62	4
			1959-1979	219	45	
	마록	638.9	1917-1922	57	8	2
1964-1979			130	37		
안성천	양령	388.0	1929-1939	84	31	2

선정된 감수부는 그림 2.1의 A의 경우 8일이상, B의 경우 감수유량 자료가 8개이상 되는 것을 선정하였다. James와 Thompson(1970)은 감수기간이 장기간 지속될 때의 자료가 최소자승법에 의한 신뢰성 있는 감수계수를 산정할 수 있다고 하였으며, 7일 이상 감수기간 자료의 이용을 제시하고 있다.

2.6 감수부의 계절적 구분

본 연구에서는 감수부를 4개 기간으로 구분하여 감수에 대한 수문·지질·지형학적 영향 분석을 시도하였다. 구분된 4개 기간은 다음과 같고, 각 기간에 분류되는 감수부는 감수기간에 관계없이 감수부 시점이 해당되는 기간에 포함된다.

- 1) 1 기간 : 3 - 6월(증발산 영향이 큰 기간)
- 2) 2 기간 : 7 - 8월(지표면 유출이 큰 기간)
- 3) 3 기간 : 9 - 11월(지하수함양량의 영향이 큰 기간)
- 4) 4 기간 : 12 - 2월(지하수 유출이 큰 기간)

3. 분석결과

3.1 선형과 비선형 감수식의 적합성

표 2.1의 선정 감수부에 선형, 비선형 감수식을 적용하여 감수계수, 각 식의 상관계수, 총유출량의 상대오차(T), 일유출량의 상대오차 평균치(R)를 구하고, 이들을 각 기간별로 구분하여 평균치를 산정하였다. 그림 3.1과 3.2는 횡축에 비선형 T,R, 종축에 선형 T,R를 각각 나타내었다. 4기간 모두에서 비선형 감수식의 오차가 선형 감수식의 오차보다 아주 작게 나타났다. 또한 그림 3.3과 3.4의 복합수문곡선 감수부에서도 같은 결과를 보여주고 있다. 또한 복합수문곡선의 감수부에서 선형식의 적용은 단일수문곡선의 감수부보다 매우 큰 오차를 나타내고 있다. 따라서 비선형감수식의 적합성이 우수함을 알수있다.

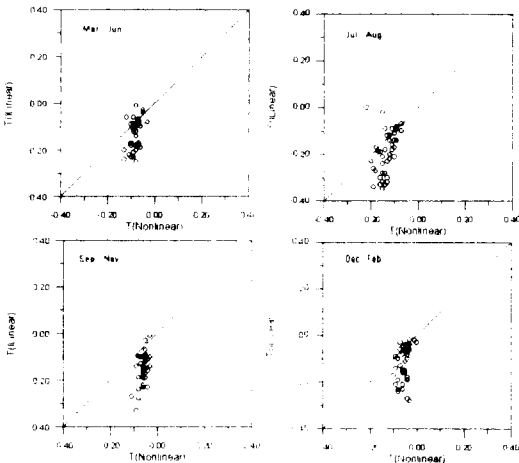


그림 3.1 단일수문곡선 감수부의 T

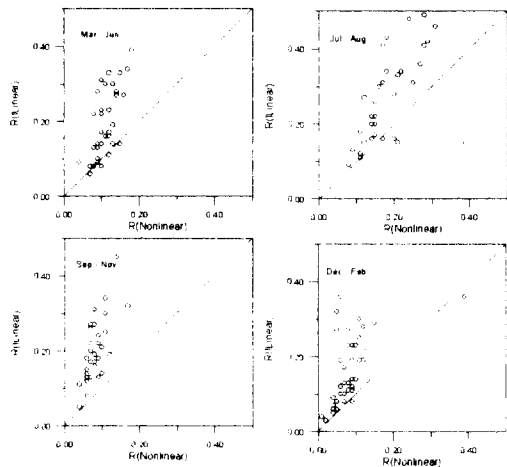


그림 3.2 단일수문곡선 감수부의 R

3.2 감수특성의 수문·지질·지형학적 영향

高木(1961)은 선형감수식의 K는 지질·지형 함수라고 하였다. Narbe(1968)는 비선형 감수식의 n 이 일정한 유역의 지질·지형특성을 나타낸다고 하였고, Q_0, m 수문학적인 요소의 함수라고 하였다.

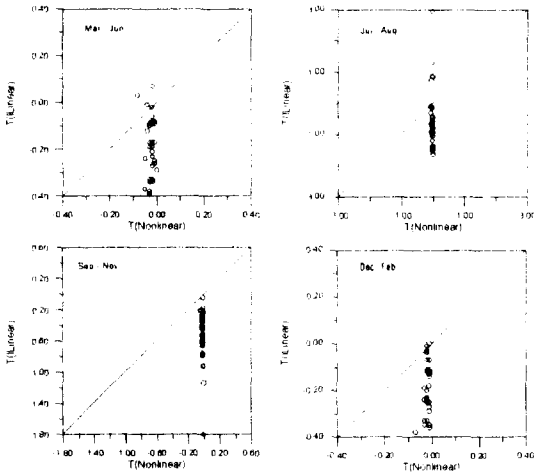


그림 3.3 복합수문곡선 감수부의 T

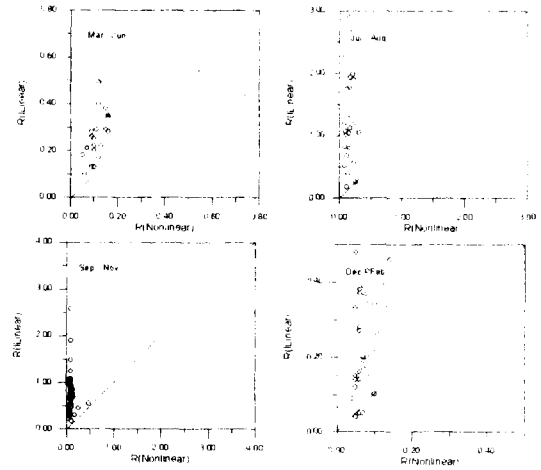


그림 3.4 복합수문곡선 감수부의 R

1) 수문·지질학적 영향

수문학적 영향을 평가하기 위하여 본 연구에서는 먼저 감수부를 4개 기간으로 분류하여 감수계수들을 구하였고, 이들 감수계수와 Q_0 의 관계를 분석하였다.

그림 3.5는 단일수문곡선 감수부 선형식의 기간별 K와 Q_0 의 관계를 나타내고 있다. 여기에서 K와 Q_0 의 관계는 일정함을 보이고 있어, 高木(1961)의 이론적 결과가 입증됨을 보여준다. 高木(1961)은 K는 Q_0 에 관계없이 일정하다고 하였고, 단지 유역면적이 크면 유출에 영향을 미치는 인자가 유역에서 같지 않고, 강우의 공간적 분포, 인위적영향으로 K의 분산이 커진다고 하였다. 그러나 본 연구의 결과는 각 기간별로는 차이를 보이고 있다. 高木(1961)은 주로 7월, 즉 같은 기간의 자료만을 분석하였으며, 이로 인해 계절별 수문학적 영향평가가 이루어지지 않은 것 같다. 따라서 K는 같은 계절에서는 일정하지만 강수량, 지하수 상태, 증발산량에 영향으로 계절별로 변화가 있음을 알 수 있다. 그림 3.5의 7-8월을 볼때 이와 같은 영향인자에서 강수량이 K에 가장 큰 영향이 있음을 제시한다.

K의 분류로 볼때 12-2월은 지하수유출특성, 7-8월의 중간유출특성을 보이고 있다.(Pilgrim, 1993). 또한 3-6월의 K는 9-11월의 K보다 작아 빠른 감수를 나타내 증발산의 영향이 큼을 알 수 있다.

그림 3.6은 복합수문곡선에 대한 것으로 K와 Q_0 의 관계가 일정하며, 단일수문곡선의 결과에 비교하여 계절적 영향이 거의 없음을 보여준다. 이는 복합수문곡선의 감수부가 지하수유출을 잘 나타내고 있음을 제시한다.

그림 3.7, 3.8은 두 감수부에 대한 비선형식의 m 과 Q_0 의 관계이다. 그림 3.7에서 $m - Q_0$ 관계는 Q_0 가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있으며 상당한 분산을 보이고 있다. 또한 계절적으로 변화가 있음을 보여 준다. 그러나 Q_0 의 분류에 따라 m 의 일정성을 분류할 수 있다. 그림 3.7에서 3-6월, 9-11월은 100cms를 전후로 m 이 일정하며, 7-8월은 300cms, 12-2월은 40cms를 전후로 일정함을 알 수 있다. 이는 m 가 단지 수문학적 함수라는 Narbe(1968)의 결과와 다르게 나타남을 보여준다. 그림 3.8의 복합수문곡선의 결과는 $m - Q_0$ 의 관계가 분산은 심하지만 계절적 변화는 작다.

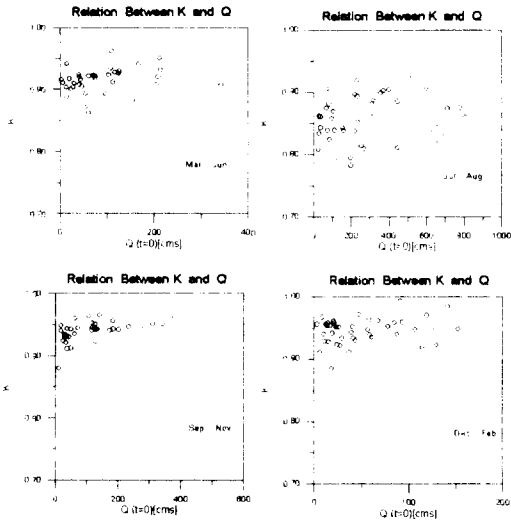


그림 3.5 K와 Q_0 의 관계(단일수문곡선)

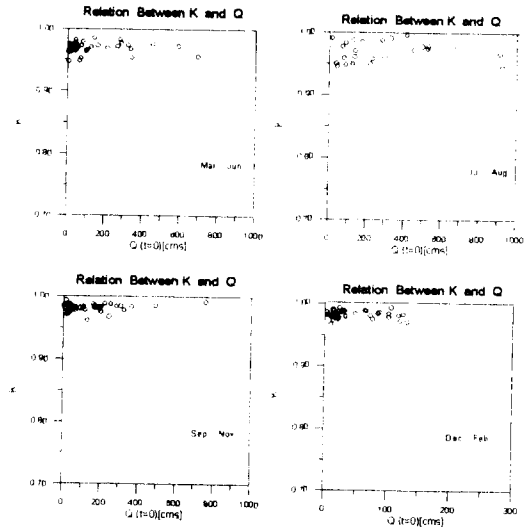


그림 3.6 K와 Q_0 의 관계(복합수문곡선)

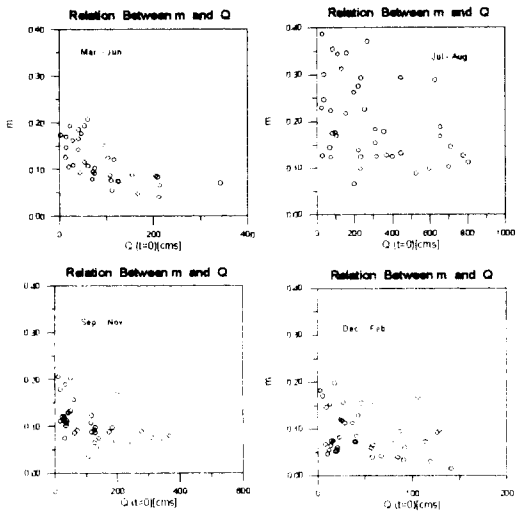


그림 3.7 m 과 Q_0 의 관계(단일수문곡선)

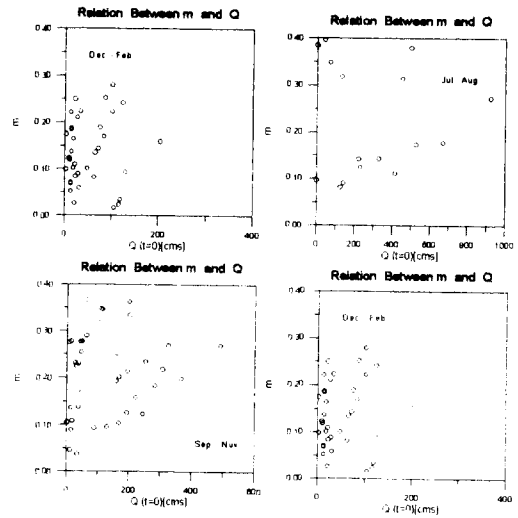


그림 3.8 m 과 Q_0 의 관계(복합수문곡선)

그림 3.9, 3.10은 각 감수부의 n 과 Q_0 로서 상당한 분산이 있지만 계절에 따른 변화가 거의 없음을 보여준다. 이는 상대적으로 안정된 지질·지형의 영향이 수문학적 영향보다 크을 나타낸다. 그러나 전체적으로 단일수문곡선의 감수부는 Q_0 의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고 복합수문곡선의 감수부는 감소하는 경향을 보인다. n 이 증가할수록 감수는 빨리 일어난다. 따라서 K와 Q_0 관계에서 처럼 n 과 Q_0 의 관계에서도 복합수문곡선의 감수부가 지하수 유출을 잘 나타냄을 알 수 있다.

2) 지형학적 영향

지형학적 영향은 유역면적과 K, m , n 의 관계에서 분석하였다. 유역면적과의 관계는, Q_0 와

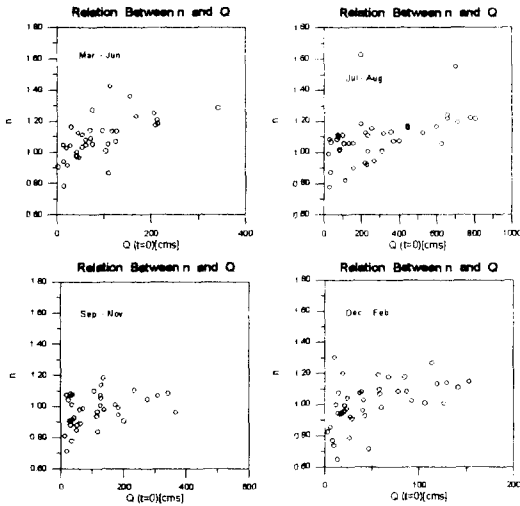


그림 3.9 n 과 Q_0 의 관계(단일수문곡선)

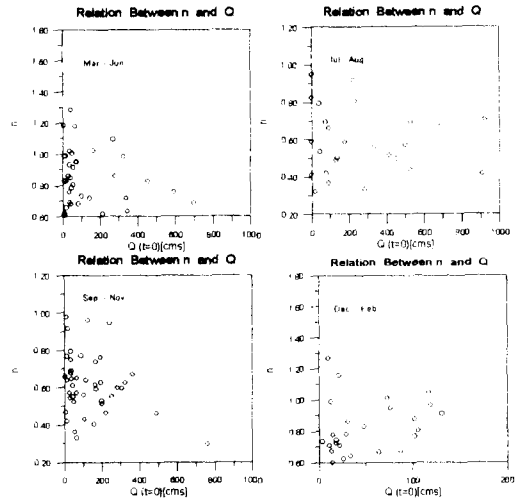


그림 3.10 n 과 Q_0 의 관계(복합수문곡선)

이들 계수의 관계와 비슷하게 나타났다. 이는 우리나라에서 유역면적에 따라 Q_0 가 비례하는 일반적인 경향을 나타내고 있다.

3. 결론

이상과 같은 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단일수문곡선의 감수부보다 복합수문곡선의 감수부가 지하수유출특성을 잘 나타내고 있다.
- 2) 비선형감수식이 선형감수식보다 적합성이 우수하였다.
- 3) 선형감수계수 K 는 같은 계절에서는 변화가 없으나, 수문특성이 다른 계절에 따라 변화가 있는 것으로 나타났다. 이는 K 가 강수량, 지하수함양량, 증발량 등의 영향이 있음을 나타낸다.
- 4) 비선형식의 m 에 영향을 주는 요소는 수문화적인 영역과 지질화적인 영역으로 구분되며 이를 구분할 수 있는 인자는 Q_0 이다.
- 5) n 은 계절적으로 큰 변화가 없었으며, 수문학적 영향보다 지질학적 영향이 큼을 알수 있었다.

5.참고문헌

1. Barnes, B.S. (1939), "The Structure of Discharge Recession Curves," Trans. Am. Geophys. Union, 20:721-725.
2. Chow, V.T., (1964), Runoff, sec. 14 in Handbook of Applied Hydrology, V.T. Chow(ed.), McGraw-Hill, New York.
3. Hall, F.R. (1968), "Base-Flow Recessions - A Review." Water Resources Reserch 4(5):973-983.
4. Horton, R.E. (1933b), "The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle." Trans. Am. Geophys. nion, 14:446-460.
5. James, L.D., and W.O. Thompson. (1970), "Least Squares Estimation of Constants in a Linear Recession Model." Water Resources Research 6(4):1062-1069.
6. Linsley, R.K., M.A. Kohler and J.L. Paulhus. (1949), Applied Hydrology, McGraw-Hill, KOGAKUSHA.
7. Narbe, S., (1968), "The Discharge Recession as Criterion on the Retention Capacity of Basins", Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ., 72:163-167.
8. Pilgrim, D.H. and I. Cordery, (1993), Flood Runoff, chpt. 9 in Handbook of Hydrology, D.R. Maidment(ed.), McGraw-Hill, New York.
9. Singh, K.P., (1969), "Theoretical Baseflow Curves." Proc. ASCE, 95,(HY6):2029-2048.
10. Singh, V.P., (1992), Elementary Hydrology, Prentice Hall, Engewood Cliffs, NJ 07632.
11. 高木不折, (1961), "低水流出的低減特性に關する研究." 日本土木學會論文報告集, 第128號:1-11.
12. 高橋裕, (1983), "山地河川の低水流出的減水特性に關する研究." 日本土木學會論文報告集, 第337號:75-82.