

우리나라 5대강 유역 지하수 함양량 추정

박창근 · 신현민 · 김성탁* · 김남중**

한국건설기술연구원, *건설교통부 수자원정책과,

**한국수자원공사 지질지하수부

1. 서론

우리나라의 지하수 개발가능량(함양량)을 추정하는 것은 수자원 계획과 관리에 있어 하나의 지표가 될 수 있으므로 추정량은 중요한 역할을 하게 된다. 지하수 함양량 추정 방법은 기저유출 분리 방법에 기초한 것으로, 지하수의 감수기간과 함양기간에 대하여 일유출수문곡선으로부터 지하수 유출곡선을 각각 분리하여 지하수 함양량을 산정하는 것이다. 제시된 기법은 개념적으로 단순하므로, 그것을 수문곡선 분석시 효율적이고 일관성 있게 적용할 수 있다.

본 연구의 목적은 우리나라 5대강 유역에 대한 지하수 개발가능량을 제시된 기법의 의하여 추정하는데 있다. 이하에서 전개될 내용에서 나타나는 식 번호와 용어는 본 연구의 전편에 있는 것임을 부언해 둔다.

2. 자료의 수집 및 정리

일유출수문곡선으로부터 지하수유출 즉 기저유출을 분리하여 지하수 함양량을 추정하고자 할 경우, 어떠한 방법으로 기저유출을 분리할 것인가 보다 더 중요한 요소는 신뢰성 있는 양질의 일유출수문곡선 자료의 수집이다. 더구나 추정되는 지하수 함양량을 검증할 방법은 현재로는 없기 때문에, 검증의 대안으로 가능한 많은 유역을 대상으로 하고 또한 한 유역내에서도 가능한 많은 유량 또는 수위관측지점을 대상으로 자료를 수집하였다. 이렇게 함으로써 지하수 함양량을 과대 또는 과소 추정할 수 있는 여지를 배제할 수 있을 뿐만 아니라 보다 신뢰성 있는 지하수 함양량 추정 결과를 얻을 수 있을 것이다.

본 연구에서 대상유역을 5대강 유역인 한강, 낙동강, 금강, 섬진강 및 영산강 유역으로 선정하였다. 상기 유역에 대하여 수집한 수문자료로는 일수위 및 일유량자료, 수위-유량곡선 자료, 각 관측지점의 유역면적, 연강수량 자료 등이 있다. 일유량자료 및 일수위자료와 수위-유량곡선 자료는 일유출수문곡선을 작성하여 지하수 함양량 추정에 이용되

고, 유역면적과 강수량 자료는 일유출수문곡선의 신뢰성을 검증하고 또한 강수량 지하수 함양량 관계를 분석하는데 이용된다.

대상 유역내 모든 관측지점에 대하여 다음의 세가지 기준을 적용하여 5대강 유역내 총 48개의 수위 및 유량관측 지점을 일차로 선정하였다. 관측지점의 일차 선정기준으로는 첫째, 갈수시 유출량에 영향을 미칠 수 있는 댐과 같은 대규모 구조물에 의한 유량조절, 유역변경, 대규모 지하수 개발 등과 같은 인위적 요소로 인하여 유역의 자연유량이 영향을 받지 않는 관측지점이어야 한다. 둘째, 지하수 유출량을 산정할 수 있도록 연중 하천흐름이 지속되는 관측지점이어야 한다. 셋째, 지하수 유출량의 신뢰성 있는 추정을 위하여 적어도 10년 이상의 충분한 기록을 제공할 수 있는 관측지점이어야 한다. 위 기준에 의해 선정된 48개 지점에 대한 수위-유량곡선을 수집하여 재정리하고, 또한 재정리된 자료와 이동률(1995)이 제시한 저수위 영역의 수위-유량곡선을 이용하여 전 지점에 대한 일유출수문곡선을 작성하였다(이동률, 일유출수문곡선집 전5권, 1994).

일차로 선정된 48개 지점에 대하여 다음의 세가지 기준에 의거하여 최종적으로 지하수 함양량 추정에 사용될 관측소의 자료를 선정하였다. 첫째, 수문곡선의 전형적인 구성성분(상승부분, 침투부분, 하강부분)이 명확히 나타나지 않는 지점의 자료는 제외한다. 둘째, 어떤 시점에서 해당 관측소의 서로 다른 수위-유량곡선을 적용할 때, 같은 수위에서 매우 큰 유량차를 나타내는 지점의 자료는 제외한다. 셋째, 유출율 분석에서 연평균 유출율이 20~80%의 범위를 벗어나는 지점의 자료는 제외한다. 이상의 기준에 의해 최종적으로 선정된 수계별 관측소, 유역면적 및 해당하는 자료의 최종 선정기간이 표 1에 수록되어 있다.

표 1에서 최종적으로 선정한 관측소는 28개 지점이고, 그중 수위관측은 18개 지점이며 유량관측은 15개 지점이다. 중복되는 관측소는 고안(한강), 현풍, 왜관(낙동강), 송정(섬진강), 나주(영산강) 등 모두 5개 지점이고, 수위자료와 중복되는 유량자료는 그 자료연수가 길지 않기 때문에 수위자료를 검증하는데 사용하였다. 여기서 수위자료는 한국건설기술연구원의 수문데이터베이스(HISS)에서 수집하였으며, 유량자료는 조선하천조사서(조선총독부, 1929)와 유량요람(1924-1940)(조선총독부 광공국, 1944)에서 수집하였다.

3. 지하수 함양량 추정 절차

지하수 함양량은 다음의 절차에 의하여 산정될 수 있다. 여기서 사용되는 식 번호와 용어는 본 논문의 전편에서의 것과 동일하고, 편의상 수식과 용어의 설명은 필요한 경우에만 첨가하였다.

- (1) 유량에 상용대수값을 취하여 일유출수문곡선을 작성한다.
 - (2) 감수기간에서 연속적인 최소 하천유량을 직선으로 연결하여 감수기간의 감수곡선 작성을 작성한다.
 - (3) 식(1)을 참조하면, 작성된 감수곡선에서 유량의 1-log cycle에 해당하는 시간 간격을 감수계수 K_1 의 값으로 산정한다. 또한 식(1)과 식(2)를 비교하면 $k = 10^{(-1/K_1)}$ 의 관계가 성립하므로, k 를 계산할 수 있다.
 - (4) 감수곡선 종점과 다음 감수곡선 시점을 직선으로 연결하여 함양기간의 지하수 유출곡선을 작성한다.
 - (5) 각 감수곡선의 시점과 종점에서 유량 ($Q_o^{(i)}, Q_e^{(i)}$)을 읽고, 함양기간 ($t_1^{(i-1)} \sim t_0^{(i)}$)과 감수기간 ($t_0^{(i)} \sim t_1^{(i)}$)을 계산한다. 감수곡선의 시점과 종점을 선정할 때 어느 정도 주관적인 오차가 발생할 여지가 있지만, 선정 작업에서 일관성을 유지한다면 그러한 오차는 지하수 함양량 추정에 큰 영향을 미치지 않는다(Meyboom, 1961).
 - (6) 식(11)을 이용하여 함양기간동안 지하수 유출량 ($V_g^{(i)}$)을 계산한다.
 - (7) 식(5)와 식(6)에 의해 각각 감수기간동안 실제지하수 유출량 $V_a^{(i)}$ 와 잔여지하수 유출량 $V_r^{(i)}$ 을 계산한 후, 함양기간동안 함양된 지하수량중 함양기간동안 유출된 지하수량을 제외한 양 $R_1^{(i)}$ 을 식(7)에 의하여 계산한다.
 - (8) 함양기간 ($t_1^{(i-1)} \sim t_0^{(i)}$) 동안 함양된 지하수량(즉 지하수 함양량) $R^{(i)}$ 를 식(12)에 의하여 계산하고, ($t_1^{(i-1)} \sim t_1^{(i)}$) 기간동안 지하수 유출량 ($V^{(i)}$)을 $V^{(i)} = V_g^{(i)} + V_a^{(i)}$ 에 의하여 계산한다.
 - (9) 연속되는 다음의 일유출수문곡선으로부터 (2)~(8)의 과정을 반복한다.
 - (10) 지하수 水文年을 기준으로 하면 함양기간과 감수기간은 각각 두번씩 발생하므로, 그것을 고려하여 연간 지하수 함양량과 지하수 유출량을 추정한다.
- 위 절차에 의하여 지하수 함양량을 추정하는 과정을 살펴보기 위하여 낙동강 현풍지점(1923년)의 경우를 고려한다. 상기 지점에 대한 일유출수문곡선과 본 연구의 전편에서 제안한 방법에 의하여 함양기간과 및 감수기간의 지하수유출 곡선이 그림 1에 도시되어 있다.

4. 5대강 유역 지하수 함양량 추정 및 분석

표 1의 각 유역별 수위 및 유량관측소에 대하여 앞 절에서 상술한 절차에 따라 일유

출수문곡선의 분석을 실시하면, 각 관측소별 연평균 지하수 함양량과 지하수 유출량을 산정할 수 있다. 한강유역에 대한 지하수 함양량 추정 결과가 표 2에 수록되어 있다.

여기서 한강유역 전체에 대하여 2월 및 6월 함양기간은 평균적으로 각각 2월 18일과 6월 24일에 시작되고, 4월 및 9월 감수기간은 각각 4월 11일과 9월 1일에 시작된다. 나머지 4개 유역에 대한 일유출수문곡선 분석 결과에 의하면 한강유역과 거의 비슷한 함양기간과 감수기간의 시점을 얻을 수 있었다. 따라서 한강유역이 남한의 북쪽에 위치하고 있다는 사실을 고려하면, 우리나라 지하수 水文年의 시점을 강우가 시작되는 2월 말경으로 선정하는 것이 타당성이 있다고 판단된다.

연평균 강수량에 대한 연평균 지하수 함양량과의 비로 정의되는 강우함양계수(α)는 한강유역에 대하여 12.0%로 추정되며, 그것은 표 2에서 각 관측소별 면적 가중평균으로 계산된 값이다. 따라서 북한지역을 제외한 한강유역의 면적이 23,026km²이므로 한강유역에 대한 연간 지하수 함양량은 35.5억톤으로 추정된다.

표 2와 같이 한강유역에 대하여 연평균 지하수 함양량을 추정한 절차에 따라 나머지 4개 유역에 대한 지하수 함양량을 추정하였고, 그 결과가 표 3에 요약 수록되어 있다.

표 3에 의하면 우리나라 5대강 유역에 대한 평균 강우함양계수는 약 10.8%로 계산되어 지고, 한강과 금강유역의 경우 강우함양계수가 높은 편에 속하고 영산강과 섬진강 유역의 경우는 낮은 편에 속한다. 5대강 유역에 대한 연간 지하수 함양량은 북한지역을 제외하면 약 88억톤에 이르고, 북한지역을 포함하면 약 93억톤에 이른다. 따라서 5대강 유역에 대한 지하수 함양량을 연간 90억톤으로 추정하면 별 무리가 없을 것으로 판단된다.

본 연구에서 추정된 지하수 함양량은 수자원공사(1994)가 갈수시 3개월간 다목적댐 유입량을 4배하여 산정한 기저유출량인 193.9억톤/년(전국대상)과는 상당한 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다(본 논문의 전면 참조). 그 이유는 갈수시 3개월간 댐유입량을 지하수유출과 직접유출의 두 성분으로 분리하지 않고, 두 성분 모두 지하수유출 즉 기저유출로 가정한 것에 기인한다고 판단된다. 한편 이동률(1995)이 추정한 5대강 유역에 대한 지하수 함양량은 약 72억톤/년으로, 그는 본 연구에서 보다 다소 낮게 추정하였다. 그 이유는 본 연구에서는 감수기간뿐만 아니라 함양기간의 지하수 유출량을 고려하여 지하수 유출량을 추정하였지만, 이동률(1995)은 갈수기 즉 감수기간의 지하수 유출량만을 고려하였기 때문이라고 판단된다.

유역면적과 감수계수(k)의 관계를 도시한 결과가 그림 2에 나타나 있다. 그림 2에 사용된 자료는 표 1의 28개 관측소에 대한 자료이다. 여기서 k 는 식(2)에서 알 수 있

듯이 지하수유출에 대한 유역의 총체적 영향을 설명하는 매개변수이다.

그림 2를 살펴보면 4월 감수기간의 k 값이 9월 감수기간의 k 값보다 작음을 알 수 있고, 그것은 일유출수문곡선 상에서 4월 감수곡선이 보다 급격히 감소함을 의미한다. 이러한 사실은 4월 감수기간에서 상대적으로 보다 많은 양의 증발산이 발생하기 때문이라 판단된다. 또한 유역면적에 따라 감수계수 k 의 값의 변화가 아주 작다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 감수계수의 특성은 비록 유역내부에서 미시적 관점에서 볼 때 지하수유출의 감수에 영향을 미치는 유역의 복잡한 거동이 예견되지만, 거시적 관점에서 볼 때 지하수유출의 감수가 유역이 비교적 균질하다는 가정에 의해 발생하고 있음을 의미한다. 이와 같은 결과는 Farvolden(1963)의 연구 결과인 지하수유출이 등방성이고 균질한 유역에서 거동하고 있다는 사실을 뒷받침하고 있다.

5. 결론

본 연구는 그 전편에서 제시한 지하수 함양량 추정 방법에 의하여 우리나라 5대강 유역에 대한 지하수 함양량을 추정하였다. 추정된 지하수 함양량은 연간 90억톤이고, 그것은 5대강 유역의 지하수 개발가능량과 같은 개념이다. 또한 장기간의 자료 분석에서 5대강 유역에 대한 연평균 저류량의 변화가 아주 작기 때문에 지하수 함양량과 지하수 유출량이 같은 값을 가진다고 할 수 있다. 여기에서 사용된 자료는 28개 관측지점에서 수집한 수위 또는 유량자료이다.

우리나라 지하수 水文年은 2월말 경에 시작되고, 한 水文年내에 함양기간과 감수기간이 각각 두 번씩 존재함을 알 수 있었다. 즉 개략적으로 함양기간은 2월말~4월중순, 6월말~9월초에 해당하고, 감수기간은 4월중순~6월말, 9월초~다음 해 2월말에 해당한다.

지하수유출에 대한 유역의 총체적 영향을 설명하는 감수계수 k 는 유역면적과 관계없이 거의 일정한 값을 가지므로, 거시적 관점에서 지하수유출의 감수가 유역이 균질하다는 가정하에서 발생하고 있음을 의미한다. 또한 4월 감수기간에서 증발산량이 상대적으로 많이 발생하므로, 4월 감수곡선에서의 감수계수 k 가 더 작은 값을 가지고 4월 감수곡선이 9월 감수곡선 보다 급격히 감소함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

Farvolden, R. N. (1963). "Geologic controls on ground-water storage and baseflow",
Jr. of Hydrology, 1, pp. 219-249

- Meyboom, P. (1961). "Estimating Ground-water Recharge from Stream Hydrology,"
 Jr. of Geophysical Research, 66(4), pp.1203-1214.
- Pilgrim, D. H. and Cordery, I. (1993). Flood Runoff, Chapt. 9 in Handbook of
 Hydrology, edited by D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York
- 이동률 (1995). 지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기갈수량 예측, 고려
 대학교 박사학위논문
- 이동률 (1994). 일유출수문곡선선집(전5권), 고려대학교 토목환경공학과
- 조선총독부 (1929). 조선헌조사서
- 조선총독부 광공국 (1944). 유량요람(1924-1940)
- 한국건설기술연구원 (1989). 수문데이터베이스(HISS)
- 한국수자원공사 (1992). 전국하천조사서
- 한국수자원공사 (1994). 지하수자원 기본조사(2차) : 지하수 이용관리법안 수립 및 대체
 용수원 개발지역 산정조사 보고서

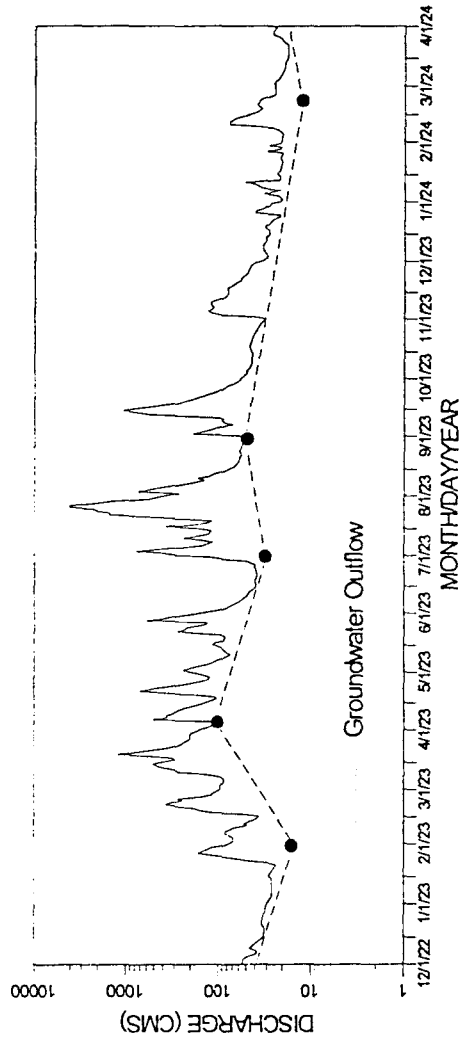


그림 1 낙동강 현풍지점 지하수 유출수문곡선

표 1 유역별 대상 수위 및 유량관측소 현황

유역	관측소	유역면적 (km ²)	최종 선정기간	연평균 강수량(mm)	연평균 유출율(%)	자료 형태**)
한강	고안 ⁾	23607.9	1917-1940	1165	52	수위
	청평	10455.5	1917-1940	1156	57	
	여주	11036.0	1958-1983	1174	60	
	충주	6624.5	1917-1940	1031	64	
	후포	1606.2	1963-1985	1165	78	
	호명	10581.5	1923-1925	1315	63	유량
	동량	6412.5	1923-1926	1231	61	
	영춘	4787.7	1936-1939	1001	59	
	팔괴	4216.5	1926-1935	1054	68	
	정선	1460.1	1934-1940	1030	52	
	화천	4207.1	1937-1940	990	56	
인계	2080.8	1927-1928 1936-1940	925	58		
낙동강	진동	20311.3	1930-1940 1958-1979	1107 1092	45 47	수위
	정암	3280.0	1957-1969	1326	43	
	독산	2304.1	1957-1969	1326	65	
	합천	1042.0	1971-1982	1005	57	
	현풍 ⁾	14000.9	1918-1940 1965-1979	1026 1043	46 41	
	왜관 ⁾	11074.4	1924-1940 1959-1979	1069 1067	40 48	
	낙동	9369.0	1924-1940 1958-1977	1003 1047	73 40	
금강	규암	8261.0	1916-1940 1963-1979	1208 1202	77 59	수위
	공주	7531.0	1917-1940 1966-1979	1172 1157	57 50	
	용담	989.5	1963-1992	1197	77	
	안남	3628.0	1923-1926	1264	41	유량
	무주	1555.2	1926-1932	1145	56	
섬진강	송정 ⁾	4255.7	1917-1940 1962-1979	1324 1378	69 51	수위
	압록	2447.5	1917-1940 1958-1979	1253 1348	63 58	
영산강	나주 ⁾	2058.7	1916-1940 1959-1979	1289 1308	43 53	수위
	마륵	684.0	1917-1922	1292	38	

*) 수위 및 유량자료가 중복되어 수집된 관측소

** 수위자료 : 한국건설기술연구원 수문데이터베이스(HISS)

유량자료 : 조선헌조사서, 조선총독부(1929)

유량요람(1924-1940), 조선총독부 광공국(1944)

표 2 한강유역 지점별 연평균 지하수 함양량

지점	유역면적 (km ²)	자료 년수	2월 함양기간			4월 함양기간			6월 함양기간			9월 함수기간			연 간				연평균 강수량 (mm)	연평균 유출율 (%)	강우함양 계수(%) α^{**}	
			시점 (월-일)	기간 (day)	V_g (mm)	시점 (월-일)	기간 (day)	V_o (mm)	R_l (mm)	시점 (월-일)	기간 (day)	V_g (mm)	R_l (mm)	시점 (월-일)	기간 (day)	V_o (mm)	R_l (mm)	함양량 R_l (mm)				유출량 V_l (mm)
고안	23,607.9	24	02-18	51	13.3	04-10	80	20.2	20.5	06-28	65	24.5	09-01	170	56.0	56.2	114.5	114.0	0.5	52	1,165	9.8
청평	10,455.5	24	02-21	50	15.8	04-12	78	25.9	25.6	06-29	69	34.2	09-06	168	75.7	76.5	152.1	151.6	0.5	57	1,156	13.2
여주	11,036.0	26	02-19	51	15.6	04-11	78	24.7	28.5	06-28	64	31.1	08-31	172	72.6	68.4	143.6	144.0	-0.4	60	1,174	12.2
충주	6,624.5	24	02-18	53	14.9	04-12	71	21.8	23.3	06-22	75	36.4	09-05	166	75.3	74.5	149.1	148.4	0.7	64	1,031	14.5
후포	1,606.2	8	02-17	51	18.0	04-09	75	35.4	46.0	06-22	72	41.5	09-02	168	72.9	62.3	167.8	167.8	0.0	78	1,165	14.4
호명	10,581.4	3	02-22	47	16.7	04-10	77	29.8	38.2	06-26	67	29.4	09-01	181	66.2	55.5	139.8	142.1	-2.3	63	1,315	10.6
동량	6,412.5	4	03-03	36	11.1	04-08	71	30.0	36.1	06-18	71	43.4	08-28	181	91.8	87.0	177.6	176.3	1.3	61	1,231	14.4
영춘	4,787.7	4	01-30	75	24.3	04-15	68	29.0	40.8	06-22	66	27.8	08-27	155	39.6	20.6	113.5	120.7	-7.2	50	1,001	11.3
팔피	4,216.5	10	02-10	58	19.5	04-09	71	31.2	46.5	06-18	76	41.1	09-02	161	68.7	52.3	159.4	160.5	-1.1	68	1,054	15.1
정선	1,460.1	7	02-13	68	18.8	04-22	74	26.2	33.0	07-04	61	24.0	09-03	162	51.7	43.6	119.4	120.7	-1.3	52	1,030	11.6
화천	4,207.1	4	02-21	50	10.6	04-12	60	20.9	31.5	06-11	82	38.8	09-01	172	62.6	53.7	134.6	132.9	1.7	56	990	13.6
인제	2,028.1	7	02-28	44	13.2	04-13	81	34.4	47.5	07-03	64	28.7	09-05	177	53.6	40.5	129.9	129.9	0.0	58	925	14.0
평균	7,252.0	12	02-18	53	16.0	04-11	74	27.5	34.8	06-24	69	33.4	09-01	169	65.6	57.6	141.8	142.4	-0.6	59.92	1,103	12.0

*) $\Delta S = R - V$

**) α = 연평균 지하수 함양량/연평균 강수량

표 3 추정된 연간 지하수 함양량

유역	한강	낙동강	금강	영산강	섬진강	5대강 ^{*)}
강우함양계수 α (%)	12.0	10.2	12.2	7.1	8.4	10.9 (10.8)
유역면적 (km^2)	26,219 (23,026)	23,817	9,805	3,371	4,943	68,155 (64,962)
연평균 강수량 (mm) ^{**)}	1,286	1,166	1,269	1,319	1,414	
지하수 함양고 (mm) ^{***)}	154	119	155	94	119	
지하수 함양량 (억톤/년)	40.4 (35.5)	28.3	15.2	3.2	5.9	93.0 (88.1)

()안의 숫자는 북한지역을 제외한 수치임

*) 5대강에 대한 수치는 유역면적 가중평균을 한 것임

**) 자료 : 전국하천조사서(한국수자원공사, 1992)

***) 지하수 함양고 = 연간 지하수 함양량/유역면적

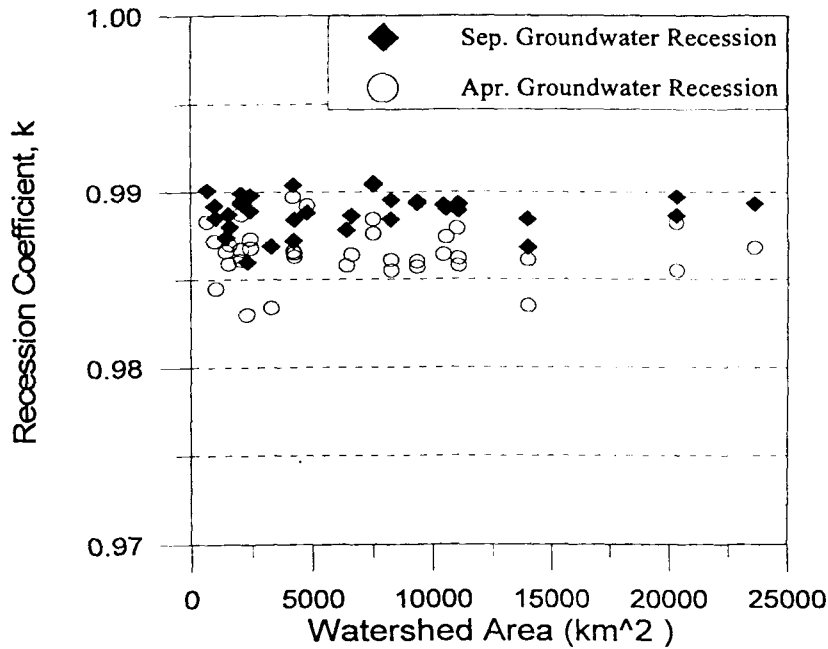


그림 2 유역면적과 감수계수(k)의 관계