

금강유역에 대한 지하수 물 순환 분석

The Analysis of Groundwater Cycle in Geum-River Basin

문장원*, 이동률**, 강신욱***
Jangwon Moon, Dong-Ryul Lee, Shin-Uk Kang

요 지

본 연구의 목적은 물 순환의 한 부분을 이루는 지하수에 대한 순환과정을 파악하는 것이다. 이를 위해 금강유역의 10개 지하수 소유역에 대해 지하수 함양량 및 유출량을 추정하였으며, 강수량, 하천유출량 및 증발산량과의 비교를 통해 거시적인 지하수 물 순환 분석을 수행하였다. 각 소유역에서의 지하수 함양량 및 유출량은 하천의 일유출 수문곡선으로부터 추정하는 방법을 이용하였으며, 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형을 이용하여 각 소유역별 하천유출량을 생성한 후 생성된 유출량을 분석하여 함양량 및 유출량에 대한 각 소유역별 특성치를 분석하였다. 분석결과 지하수 함양은 봄철부터 여름철까지 지속적으로 상승하는 형태를 나타내고 있었으며, 가을철에는 매우 작은 함양량을 나타내고 있었다. 지하수 유출의 경우에는 다른 계절에 비해 여름철에 상대적으로 많은 양의 유출을 보이고 있었으며, 나머지 다른 계절에는 상대적으로 유사한 크기의 유출을 보이고 있었다. 또한 모형을 통해 분석된 연간 지하수 함양량과 유출량은 매우 유사한 값을 나타내고 있었으며, 총 강수량과의 비교에서도 과거 연구결과와 유사한 결과를 나타내고 있었다. 따라서 본 연구에서 제시된 유역 내 지하수 물 순환의 정량적 해석은 지표수-지하수 연계 운영의 거시적 해석에 필요한 기본 정보를 줄 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지하수, 물 순환, 감수곡선 전이방법, 지하수 함양, 지하수 유출

1. 서 론

갈수기에 하천으로 유출되는 지하수를 지하수 유출(groundwater runoff) 또는 기저유출(base flow)이라고 하며, 지하수 유출량은 하천의 유출수문곡선에 대한 분석을 통해 추정할 수 있다. 갈수기간 중에 하천수는 기본적으로 지표유출로부터 형성되지만, 갈수기가 지속되면 모든 하천수는 기저유출, 즉 지하수 유출에 의하여 형성된다(건설교통부, 1999). 따라서 어떤 유역에 대한 지하수 유출은 해당 유역의 출구에서 관측된 장기간의 유출량자료를 획득한 후 수문곡선 분리에 의해 분석함으로써 정량화할 수 있다.

지하수 함양량은 강수에 의해 지표면으로 침투한 물이 침투에 의해 통기대를 거쳐 지하저수지에 도달하여 증가된 지하저수량이다(Rushton과 Ward, 1979). 지하수 함양량은 결국 지하수 이용 가능량으로 지하수자원의 평가를 위한 가장 중요한 요소이다(이동률과 윤용남, 1996). 지하수 함양량을 추정하는 방법으로는 하천의 유출수문곡선으로부터 감수곡선을 결정하여 이를 이용하는 방법, 지하수 흐름모형을 이용하는 방법, 물수지에 의한 방법, 지하수위 변동을 이용하는 방법, 동위체를 이용하는 방법, 경험식에 의한 방법 등 여러 가지 연구결과가 제시되어 왔으며, 이 중 감수곡선을 이용하는 방법이 가장 널리 적용되어 왔다. Rorabaugh(1964)는 지하수 함양량을 추정하기 위한 방법으로 감수곡선 전이방법(recession-curve displacement method)을 제안하였으며, Rutledge(1998)는 이 방법을 전산프로그램화한 RORA 모형을 개발하였다.

본 연구에서는 금강유역의 10개 지하수 소유역에 대해 탱크모형을 이용하여 일유출자료를 생성한 후 이를 이용하여 지하수 유출량과 함양량을 분석하였다. 지하수 유출량은 기저유출 분석모형인 Automated Digital Filter(Nathan과 McMahon, 1990)와 PART 모형(Rutledge, 1998)을 이용하여 분석하였으며, RORA 모형을 이용하여 함양량 분석을 수행하였다. 산정된 지하수 유출량 및 함양량을 비교하여 지하수 시스템에서의 순환관계를 파악하였으며, 총 강수량 및 하천의 직접유출량 등과 비교하여 수문순환계에 대한 거시적인 순환관계를 분석하였다. 이를 통해 금강유역에서 이루어지는 하천수와 지하수의 물 순환관계에 대해 보다 명확한 지표를 제시하고자 하였다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : jwmoon@kict.re.kr

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : dryi@kict.re.kr

*** 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구부 수자원시스템연구소 연구원 · E-mail : sukang@kowaco.or.kr

2. 지하수 유출량 및 함양량 평가 모형

2.1 Automated Recursive Digital Filter

Nathan과 McMahon(1990)은 유량수문곡선에서 지하수 유출량을 분리하기 위해 전자신호해석 및 처리에 사용되는 순환 디지털 필터(recursive digital filter) 기법을 처음으로 적용하였다. 이 기법은 물리적 근거가 없음에도 불구하고 기존의 방법에 비해 객관적이며, 재현성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 이 방법에서는 지하수 유출과 지표면 유출을 각각 저주파와 고주파 신호로 간주하며, 지하수 유출(저주파 신호)을 제거한 지표면 유출(고주파 신호)은 전자신호처리에서 여과된 고주파 신호와 유사하다고 보고 지하수 유출량 분리에 이용하였다. 디지털 필터 기법은 사용자의 선택에 따라 유량수문곡선을 세 번의 여과과정(전진, 후진, 전진)을 거쳐 분리할 수 있다. 일반적으로 세 번의 여과를 거쳐 생성된 지하수 유출량의 비율은 각 단계를 거치면서 점차 작아지게 되며, 이러한 옵션은 사용자가 지점 상황에 맞게 모형을 적용할 수 있도록 하기 위한 유연성을 제공한다.

2.2 PART 모형

PART 모형은 전통적인 수문곡선 분리방법을 전산화한 모형으로 Rutledge(1998)에 의해 제시되었다. 이 모형은 수문곡선 분리를 통해 기저유출, 즉 지하수 유출량을 평가하기 위해 이용되며, 기존의 수문곡선 분리방법과 마찬가지로 일유출량자료를 이용하여 지하수 유출량을 산정한다. 강우 등으로 인한 지표유출 발생 시에는 선행보간 방법을 이용하여 지하수 유출량을 추정하며, N-day법을 이용하여 지표유출이 종료되는 시점을 결정한다. PART 모형을 적용할 경우 대상지점의 자료는 장기간의 자료를 이용하는 것이 좋으며, Rutledge(1998)는 최소한 1년 이상의 일유출량자료를 이용하여 모형에 적용할 것을 추천하고 있다.

2.3 RORA 모형

RORA 모형은 지하수 함양량을 산정하기 위해 제시된 방법 중 하나인 감수곡선 전이법(recession-curve displacement method)을 프로그램화한 모형이다. 감수곡선 전이법은 Rorabaugh(1964)에 의해 제안되었으며, 지하수 함양을 일으키는 홍수사상이 발생할 경우 감수곡선은 상승 이동한다는 이론에 기초하고 있다. 지하수 함양을 일으키는 홍수사상의 발생은 지하수 시스템 내의 잠재 지하수 유출용적을 증가시키게 되며, 잠재 지하수 유출용적 산정을 위해 Meyboom(1961)에 의해 제시된 관계를 이용한다.

RORA 모형은 일유출자료를 이용하여 지하수 유출(기저유출) 감수부에 대한 분석과 지하수 함양을 일으키는 홍수사상에 대한 판단 및 침투유량 발생 후 임계시간 동안 감수곡선의 외삽 등을 수행하여 각 사상으로 인해 발생하는 지하수 함양량을 산정한다. RORA 모형을 이용하여 지하수 함양량을 산정하기 위한 첫 번째 단계는 N-day법을 이용하여 지표유출과 중간유출이 종료되는 시점을 결정하는 것이며, 지표유출과 중간유출이 종료되기 위해 필요한 시간을 결정하고 난 후 일유출자료를 검토하여 이러한 조건에 적합한 지하수 유출 감수부를 선택한다. RORA 모형에서는 연속되는 두 개의 지하수 유출 감수부 사이에서 가장 큰 유량을 침투유량으로 인식하게 되며, 침투유량이 발생하는 홍수사상을 지하수 함양 사상으로 고려하게 된다.

3. 대상유역 및 하천유출량 자료의 생성

3.1 대상유역

본 연구에서는 지하수 함양 및 유출을 분석하기 위한 대상유역으로 금강유역을 선정하였다. 하천유출수문곡선을 이용하여 지하수 함양량과 유출량을 분석하기 위해서는 금강유역을 여러 개의 소유역으로 구분할 필요가 있다. 지하수 관리 기본 계획(건설교통부, 1996)에 의하면 지형 및 수문지질 특성이 유사한 지역과 주요 하천, 댐, 수위관측소 설치지점을 참고로 전국을 78개 지하수 소유역으로 구분하고 있다. 이러한 지하수 소유역은 주요 지하수 관련 정보를 취합하고 정리하기 위한 기본 단위로 활용되고 있으며, 금강유역에는 전국 78개 소유역 중 10개 소유역이 포함되어 있다. 그림 1은

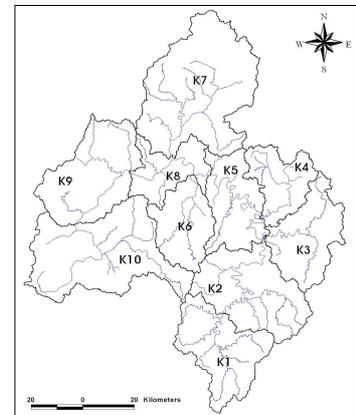


그림 1. 금강유역의 하천 및 지하수 소유역 현황

금강의 하천수계와 지하수 소유역 현황을 나타내고 있다. 본 연구에서는 10개 지하수 소유역에 대해 탱크모형으로 생성된 하천유출량 자료를 이용하여 지하수 유출 및 함양 분석을 수행하였다.

3.2 하천유출량 자료의 생성

금강유역의 10개 지하수 소유역에 대한 일유출량 자료를 생성하기 위해 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형을 이용하였다. 그림 2는 본 연구에서 이용된 탱크모형에 대한 모식도를 나타내고 있다. 모형의 매개변수 추정을 위해 대청댐, 용담, 석화역의 일유출량 관측자료를 이용하였으며, 소유역 K3, K4, K5, K6, K8, K9, K10은 대청댐, K1과 K2는 용담, K7은 석화유역의 매개변수 추정결과를 이용하여 일유출량을 모의하였다. 각 소유역의 유출량 산정에 이용된 일강수량 자료는 소유역 내에 위치하고 있는 건설교통부, 한국수자원공사, 기상청의 일강수량 관측자료를 산술평균하였으며, 1966년부터 1998년까지 33년간의 관측자료를 이용하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 각 소유역별 유출자료를 모의하였으며, 계산된 소유역별 유출량의 적정성을 평가하기 위해 수자원장기계획(건설교통부, 2001)에서 금강유역에 대해 제시된 유출량과 비교하였다. 비교 대상자료는 1967~1998년의 월별 평균 유출량이며, 비교 결과 본 연구에서 산정된 유출량이 수자원장기계획에서 제시된 유출량보다 약 7.4% 정도 크게 산정된 것으로 나타났다.

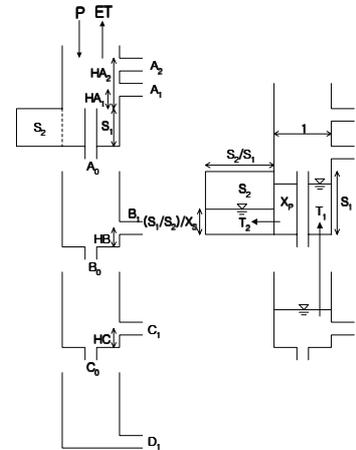


그림 2. 토양수분 저류구조를 갖는 탱크모형 모식도

4. 적용 결과 및 비교 분석

4.1 지하수 유출량

Recursive Digital Filter 기법과 PART 모형을 이용하여 금강유역의 10개 지하수 소유역에 대한 지하수 유출량 평가를 수행하였다. 앞서 언급한 것과 같이 탱크모형을 이용해 모의된 일유출량 자료를 이용하였으며, 1966년부터 1998년까지 총 33년의 자료를 이용하였다. Digital Filter 기법 및 PART 모형에 의해 산정된 지하수 유출량의 각 분기별 평균값을 표 2에 정리하였다.

각 모형에 의한 지하수 유출량 산정결과를 살펴보면, 모형에 관계없이 7~9월의 유출량이 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 나머지 기간에는 거의 일정한 유출이 발생하고 있음을 알 수 있다. Digital Filter의 경우 여과가 진행됨에 따라 산정되는 유출량의 크기가 감소하는 결과를 보여주고 있으며, 여과 단계별(Pass 1, 2, 3)로 산정된 값을 평균한 결과와 PART 모형의 적용결과가 유사하게 나타나고 있다. 각 방법을 통해 산정된 결과를 보면 양에 있어서는 다소 차이를 보이고 있으나, 변동양상은 매우 유사한 분포를 보이고 있다. 이와 같은 결과를 종합해보면, 금강유역의 지하수 유출량은 약 280~300mm/년의 범위 내에 있다고 판단할 수 있으며, 이는 금강유역 총 강수량 1207.9mm의 약 24%에 해당하는 양으로 과거 연구에서 제시되고 있는 총 강수량 대비 평저수기 유출의 비율과 유사하게 나타나고 있다.

표 2. 지하수 유출량 비교(단위: mm)

구 분	1~3월	4~6월	7~9월	10~12월	합계
Pass 1	44.1	68.2	207.4	55.4	375.1
Pass 2	36.3	50.2	128.7	43.1	258.4
Pass 3	32.2	39.6	97.6	39.3	208.8
PART	42.7	55.5	147.6	52.4	298.4

4.2 지하수 함양량

금강유역 10개 지하수 소유역에서의 지하수 함양량을 추정하기 위해 RORA 모형을 이용하였다. 분석 대상소유역의 일유출량 자료는 지하수 유출량 분석과 마찬가지로 탱크모형에 의해 생성된 자료를 이용하였으며, 기간 또한 지하수 유출량 분석과 동일하다. 표 3은 RORA 모형에 의해 산정된 각 소유역별 지하수 함양량의 분기별 평균값을 나타내고 있으며, 그림 3은 강수량 및 지하수 유출량(Digital Filter Pass 2, PART)과 함께 도시하여 비교한 것이다.

표 3. 각 분기별 평균 지하수 함양량(단위: mm)

소유역	1~3월	4~6월	7~9월	10~12월	합계
K1	70.4	119.6	140.9	51.9	382.9
K2	68.5	122.3	136.9	42.8	370.5
K3	36.8	76.7	131.6	-5.1	239.9
K4	47.4	98.2	162.6	1.6	309.8
K5	46.7	77.5	136.2	7.0	267.5
K6	58.4	87.3	163.1	26.8	335.5
K7	49.8	91.8	173.4	24.2	339.1
K8	44.7	82.5	155.6	12.9	295.7
K9	42.3	95.5	143.1	5.9	286.8
K10	44.1	88.0	122.8	14.4	269.3
평균	50.9	93.9	146.6	18.2	309.7

표 3의 결과를 살펴보면, 1월부터 9월까지 지하수 함양량은 지속적인 증가추세를 보이고 있으며, 이후로는 감소하는 연간 변동양상을 보여주고 있다. 특히 전체 강수량의 대부분이 집중되는 7~9월까지의 기간 동안에 발생하는 지하수 함양량은 1년 동안 발생하는 총 지하수 함양량의 절반가량을 차지하고 있음을 알 수 있으며, 이로부터 지하수 함양이 강수량의 발생 양상과 매우 밀접하게 연관되어 있다고 판단할 수 있다. 따라서 1년 중 지하수위가 낮게 나타나는 1분기와 2분기에는 강수량 중 상대적으로 많은 부분이 함양된다고 볼 수 있으며, 여름철의 많은 강수로 지하수위가 상승한 후 점차 하강하는 기간인 10월 이후로는 강수량에 비해 상대적으로 적은 함양량을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 그림 3을 통해서도 확인할 수 있다.

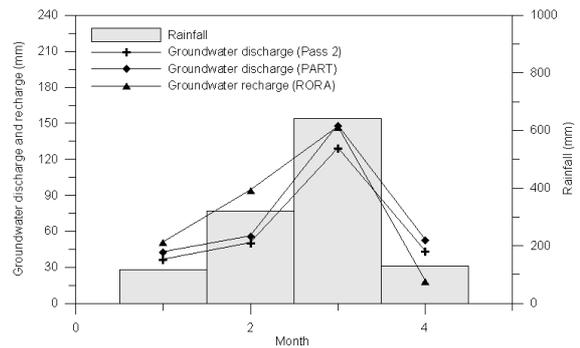


그림 3. 각 분기별 강수량, 지하수 유출량 및 함양량 비교

금강유역의 10개 지하수 소유역에 대한 지하수 함양량 산정결과를 토대로 금강유역에 대한 개략적인 지하수 함양 특성을 살펴보면, 이 지역은 연간 약 1,200mm의 강수가 발생하며, 이 중 약 25%에 해당하는 약 310mm 정도가 함양되는 것으로 판단된다. 이를 지하수 유출량 산정결과와 비교해보면 약 10~20mm 정도 크게 나타나고 있으나 이는 약 30년간의 자료에 대한 분석결과를 평균하는 과정에서 나타나는 차이로 볼 수 있다. 따라서 산정된 지하수 유출량과 함양량은 매우 유사하게 나타나고 있다고 판단할 수 있다.

4.3 기존 연구결과와의 비교

지금까지 RORA 모형을 이용하여 금강유역에 위치한 10개 지하수 소유역에 대한 함양량 분석을 수행하였으며, 이 결과를 지금까지 국내에서 수행되었던 지하수 함양량 평가 관련 연구성과와 비교하였다. 표 4는 관련 연구결과를 정리한 내용이며, 본 연구의 결과도 함께 정리하였다.

본 연구에서 제시된 결과는 과거 다른 연구결과에 비해 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 과거 연구결과 중 수문곡선 분석에 의해 제시된 값들이 주로 갈수기의 지하수 유출량만을 고려하였으나 본 연구에서는 갈수기뿐만 아니라 홍수기에 대한 분석도 포함하였기 때문인 것으로 보인다. 또한 과거 연구결과들은 유역 내에 위치하는 대표적인 관측소에 대한 분석을 통해 이를 전 유역으로 확장하여 적용하였으므로 유역을 구성하는 소유역의 특성을 적절히 반영하기 힘들다고 볼 수 있으며, 따라서 개략적인 추정치를 제시한 것으로 판단할 수 있다. 단, 본 연구의 경우 실제 관측된 유출자료를 이용한 것이 아니라 탱크모형을 이용하여 모의된 자료를 분석에 이용하였으므로 추후 관측자료에 대한 분석을 통해 본 연구의 결과와 비교해볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

표 4. 과거 지하수 함양량 추정 관련 연구결과와의 비교

적용방법	연구자 또는 기관	추정량 (억톤/년)	연평균 강수량에 대한 비율 (%)
불수지	선우중호(1992)	100~150	7.9~11.8
	최병수(1992)	205	16
	이천복(1994)	228	18
	강장신(1997)	247	20.1
기저유출리	수자원공사(1993)	134.3(15.5) ^{주1)}	10.6(12.5) ^{주1)}
	수자원공사(1994)	193.9(22.0) ^{주1)}	15.3(17.6) ^{주1)}
	수자원공사(1995)	186.3	14.7
	이동률(1996)	72.0(10.8) ^{주1)}	7.8(9.7) ^{주1)}
	박창근(1996)	93.0(15.2) ^{주1)}	10.9(12.2) ^{주1)}
지하수위 변동	본 연구	30.9	25.6
	수자원공사(2002) ^{주2)}	21.9	24.9

주1) 괄호안의 내용은 금강유역에 대한 산정결과임.
 주2) 수자원공사(2002)의 결과는 금강유역에 대한 적용결과임.

5. 지하수 유출량 및 함양량 산정 결과를 이용한 거시적 물 순환 분석

지금까지 산정된 지하수 함양 및 유출량 분석 결과를 이용하여 금강유역에 대한 거시적 물 순환 분석을 수행하였다. 금강유역에서는 1년 동안 약 310mm 가량의 지하수 함양이 발생하며, 이 중 약 96%에 해당하는 298mm 정도가 하천으로 유출하

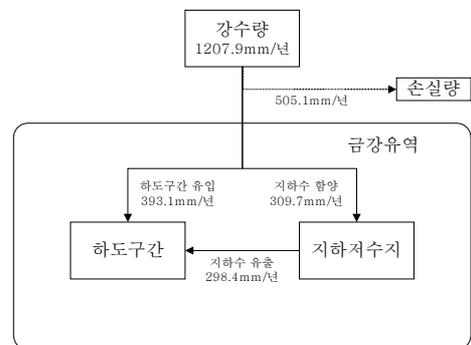


그림 4. 지하수 관련 물 순환 모식도

는 것으로 나타났다. 유역통합 물수지 분석 모형인 K-WEAP에서는 지표수-지하수의 연계 운영을 수행하기 위해서는 이와 같은 정보를 입력해야 하며, 본 연구의 지하수 물 순환에 관한 정보는 금강유역에 대한 지표수-지하수의 거시적 연계 운영에 필요한 기초 정보로서 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구의 목적은 물 순환의 한 부분을 이루는 지하수에 대한 순환과정을 파악하는 것이다. 이를 위해 금강유역의 10개 지하수 소유역에 대한 일유출량 자료를 생성하여 지하수 유출량 및 함양량 분석을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Recursive Digital Filter 기법 및 PART 모형을 이용하여 지하수 유출량을 산정한 결과, 금강유역 평균 290mm/년가량의 지하수 유출이 이루어지고 있었으며, 여름철 우기를 제외한 나머지 기간에서는 상대적으로 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다.

2. 지하수 함양량 산정 모형인 RORA 모형을 이용하여 금강유역 10개 지하수 소유역에 대해 함양량을 추정된 결과, 평균 310mm/년가량의 함양이 이루어지고 있었으며, 이는 총 강수량의 25%에 해당하는 양으로 추정되었다. 또한 연중 9월 이전까지는 지속적인 함양의 증가가 나타나며, 10월 이후로는 우기에 상승된 지하수위의 영향으로 지하수 함양량의 변동양상이 다른 기간에 비해 상대적으로 적게 나타나고 있었다.

3. 과거 연구결과와의 비교를 통해 본 연구의 결과가 상대적으로 큰 값을 나타내고 있었으나, 이는 과거 연구결과들이 갈수기 위주로 분석을 수행하였으며, 유역 내 대표적인 지점에서의 분석 결과를 유역전체로 확대 적용하면서 나타난 결과라고 판단되었다.

지금까지의 연구결과를 통해 금강유역에 대한 거시적인 지하수 순환에 대해 파악할 수 있었으며, 이는 지표수-지하수의 거시적 연계 운영을 위해 필요한 기초 정보로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 1-5-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1996). 지하수 관리 기본 계획 보고서.
- 건설교통부, 한국수자원공사 (1999). 지하수위 장기 관측자료를 활용한 함양량 산정기법 연구 보고서.
- 건설교통부, 한국수자원공사 (2001). 수자원장기종합계획 보고서(Water Vision 2020).
- 강장신 (1997). “지하수 수량의 평가”, 지하수 자원의 개발보전관리심포지엄, 한국수자원공학회, pp. 127-184.
- 박창근 (1996). “우리나라 지하수 개발가능량 추정 : 2. 5대강 유역에의 적용”, 지하수환경학회 논문집, Vol.3, No.1, pp. 21-26.
- 선우중호 (1992). “우리나라 지하수 개발의 필요성”, 물관련 정책토론회, 건설부·수자원공사, pp. 99-119.
- 이동률, 윤용남 (1996). “우리나라의 지하수 함양량 추정과 분석”, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제II-4호, pp. 321-334.
- 이천복 (1994). 한국의 지하수자원과 개발방향, 지하수개발과 농어촌용수, 농어촌진흥공사, pp. 133-164.
- 최병수(1992). “지하수 개발의 현황과 문제점”, 물관련 정책토론회, 건설부·수자원공사, pp. 157-170.
- 한국수자원공사 (1993). 지하수자원 기본조사 보고서.
- 한국수자원공사 (1994). 지하수자원 기본조사(2차) : 지하수 이용관리법안수립 및 대체용수원 개발지역 산정조사 보고서.
- 한국수자원공사 (1995). 지하수자원 기본조사(3차) : 지하수 관리조사 보고서.
- 한국수자원공사 (2002). 금강권역 광역 지하수 조사 연구.
- Meyboom, P. (1961). “Estimating groundwater recharge from stream hydrographs.”, *Journal of Geophysical Research*, Vol.66, No.4, pp. 1203-1214.
- Nathan, R.J. and McMahon, T.A. (1990). “Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis.”, *Water Resources Research*, Vol.26, No.7, pp. 1465-1473.
- Rorabaugh, M.I. (1964). “Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow.”, *International Association of Scientific Hydrology*, Publication 63, pp. 432-441.
- Rushton, K.R., and Ward, C. (1979). “The estimation of groundwater recharge.”, *Journal of Hydrology*, Vol.41, pp. 345-361.
- Rutledge, A.T. (1998). *Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow data - update*, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148.