지표수-지하수의 연계 수치모형

유 동 훈*, 오 윤 창**

1. 서 론

지표수(지표면 유출, 하천)와 지하수는 서로 밀접한 관계가 있기 때문에 상호간의 관계를 파악하고 정량적으로 해석하는 것은 지표수-지하수 연계운영에 있어서 매우 중요하다. 따라서 지표수와 지하수의 개별적인 해석에 있어서도 지표수, 복류수, 지하수의 상호작용에 관하여 심층적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 지하수와 하천의 관계를 개념적이면서도 물리적으로 타당한 해석방법을 강구하였으며 지표고가 높은 산악지역에서 강우시 지표하 흐름을 복류수흐름으로 간주하여 해석하였다. 하천과 지하수의 경계부에서는 하천수위와 지하수위와의 차를 고려하여 경계조건을 해석하였고 복류수층과 자유수면을 가진 지하수층의 접합부도 동적으로 연계하여 수치모형을 구성하였다.

2. 지표수-지하수의 연계

지표면 유출과 하천, 지하수와 하천은 서로 밀접한 관계가 있기 때문에 상호간의 관계를 파악하고 정량적으로 해석하는 것은 지표수-지하수 연계운영에 있어서 매우 중요하다. 우선 하천 흐름의 지배방정식으로 연속방정식과 운동량방정식을 제시하고(Hann, et al., 1994), 각 방정식의 Source 항으로서 각 연계요인들이 어떻게 산정되는지 기술한다.

하천 흐름의 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B_S}\frac{\partial Q}{\partial x} = S \tag{1}$$

여기서 h는 수심, B_s는 하천수면폭, Q는 유출량, S는 지표면 유출에 의한 측방유입량 또는 지하수로부터의 유입량이다.

운동량 방정식은 다음과 같다.

---

* 아주대학교 환경도시공학부 교수
** 아주대학교 건설교통학과 석사과정

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA(\frac{\partial h}{\partial x} - i) + \frac{C}{H}|V|Q = 0 \quad (2)$$

여기서 V는 단면 평균유속, A는 통수단면적, i는 수로경사, C는 마찰계수, H는 동수반경이다.

2.1 강우로부터의 하천유입량

강우시 대부분의 하천 유출은 직접유출중에서도 지표면 유출을 통해 하천흐름이 결정된다. 특히, 지표면 경사가 급한 지역에서는 강우시 지표면유출이 하천으로 짧은 시간내에 빠르게 유입되어 하천 유량과 수위 증가에 많은 영향을 미칠 뿐 아니라 하천 흐름에 상당한 영향을 준다. 그림 1에 도시된 바와 같이 지표면 유입량을 측방 유입량으로 간주할 경우 하천 흐름에는 측방으로 유입되는 유량과 유속으로 표기되는데 연속방정식과 운동량방정식을 통하여 그 영향을 고려할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 지표면 유출이 하천흐름에 수직방향으로 유입된다고 가정하였으며 지표면 유입량과 하천유출 사이에 질량 불변의 법칙을 적용하였다. 따라서 식 (1)에서와 같이 하천흐름의 연속방정식에 지표면으로부터 들어오는 측방유입량을 고려하였으며, 지표면 유출이 하천으로 유입할 시 수직방향으로 유입된다고 가정하였기 때문에 지표면 유출의 하천방향 속도 성분은 영이 되므로 식 (2)의 운동량방정식에는 아무런 영향을 미치지 않는다고 가정하였다.

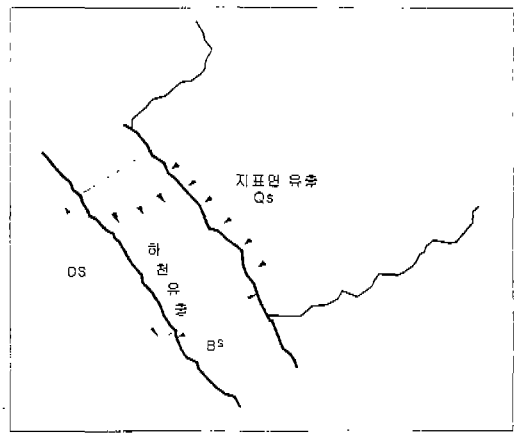

그림 1 하천-지표수 연계 모형도

그림 1에서 알 수 있듯이 측방 유입량 S_S는 하천 구간내 하천 표면적당 지표면에서 유입되는 유량으로 다음과 같다.

$$S_S = \frac{Q_S}{A_w} \quad (3)$$

여기서 Q_S는 강우 지표면 유출량이며 A_w는 하천격자 표면적으로 $A_w = B_S \times \Delta s$이다.

2.2 하천과 지하수의 연계

하천과 지하수는 서로 밀접한 관계에 있음에도 불구하고 서로간의 관계를 파악하는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 지하수와 하천의 관계를 개념적이면서도 물리적으로도 타당한 연계방법을 강구하였다. 지하수와 하천이 만나는 형상을 그림 2에 제시하였다.

(1) 지하수에서 하천으로의 유입

그림 2 에서 지하수위가 하천수위보다 높으면 수위차로 인하여 지하수에서 하천으로 물이 유입된다. 지하수에서 하천으로 유입되는 유량 Q_{GR}은 다음과 같다.

$$Q_{GR} = q\Delta L_R \tag{4}$$

여기서 q는 단위폭당 유량이고 ΔL_R은 하천 단면간의 거리, 즉 하천 격자 크기이다.

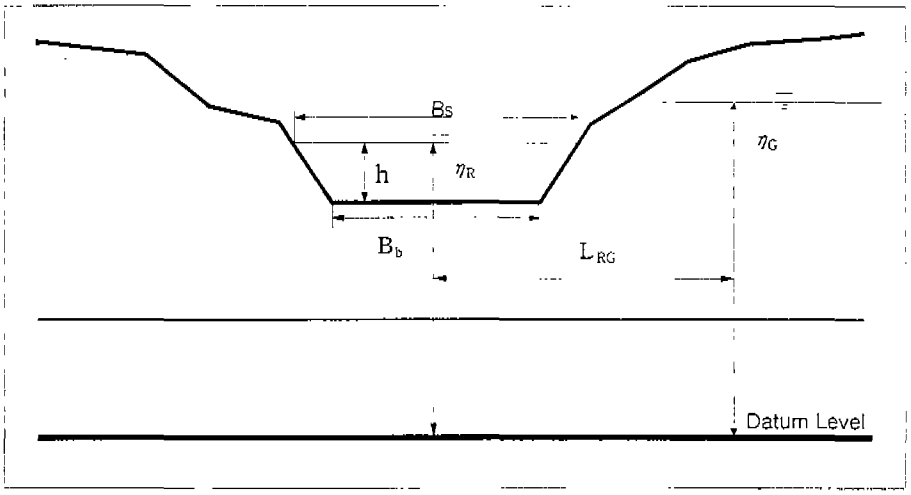

그림 2 하천-지하수 모형도

단위폭당 유량 q는 다음과 같이 산정된다.

$$q = (B_b + h)K\frac{\eta_G - \eta_R}{L_{RG}} \tag{5}$$

여기서 B_b는 하천바닥의 폭, h는 하천의 수심, η_R는 기준면으로부터의 하천수위, η_G는 기준면으로부터의 지하수위, L_{RG}는 하천 단면과 가장 근접한 지하수 격자간의 거리이다. 따라서 하천과 지하수간의 유출입율(단위 면적당 유량) S_G는 유량 Q를 수표면적 A_w로 나누어 주어 구할 수

있으며 다음과 같다.

$$S_G = \frac{Q}{A_w} = \frac{q\Delta L_R}{\Delta L_R \times B_s} = \frac{q}{B_s} \tag{6}$$

(2) 하천에서 지하수로의 유입

그림 2 에서 하천수위가 지하수위보다 높으면 수위차로 인하여 하천에서 지하수로 물이 유입된다. 지하수 지배방정식은 다음과 같다(Wang and Anderson, 1990).

$$\frac{S}{T}\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = \frac{R}{T} \tag{7}$$

$$R = R_p + R_r$$

여기서 η는 지하수의 수위, R은 총 유출입율, R_p는 강우로부터 침투되는 유입율, R_r은 하천으로부터의 유출입율이다.

하천에서 지하수로 유입되는 유량 Q_{RG}는 다음과 같다.

$$Q_{RG} = q\Delta L_G \tag{8}$$

여기서 q는 단위폭당 유량이고 ΔL_G는 지하수 격자 크기이다 .

$$q = (B_b + h)K\frac{\eta_R - \eta_G}{L_{RG}} \tag{9}$$

따라서 하천에서 지하수로 유입되는 유출입율 R_r은 하천에서 지하수로 유입되는 유량을 지하수 격자면적으로 나누어 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$R_r = \frac{q\Delta L_G}{\Delta L_G \times \Delta L_G} = \frac{q}{\Delta L_G} \tag{10}$$

2.3 복류수와 지하수의 연계

지표고가 높은 산악지역에서의 지하수흐름은 수면층이 불분명한 복류수층이고 지표고가 비교적 낮은 지역은 자유수면을 가진 지하수 흐름의 특성을 갖는다고 할 수 있다. 복류수층 흐름과 자유수면을 가진 지하수의 흐름은 동일한 지배방정식을 사용하나 해석방법은 다르다. 따라서 평지가 아닌 넓은 지역의 지하수 흐름을 해석하기 위해서는 복류수층과 자유수면을 가진 지하수 흐름의 접합부를 고려해야 한다. 복류수층의 흐름특성이 불분명하고 불투수층의 기울기에 의하여 흐름이

결정된다고 할 수 있기 때문에 접합부에서는 단지 복류수층에서 자유수면을 가진 대수층으로 유량이 흘러 들어간다고 할 수 있다.

3. 수치모형의 적용

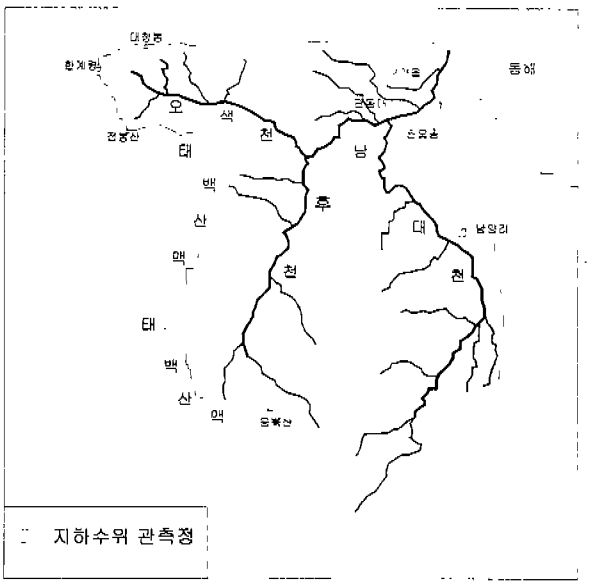

그림 3 시험유역인 양양 남대천 유역의 평면도

지표면 유출, 하천 유출, 지하수 흐름의 통합모형인 [SIRG]를 이용하여 시험유역인 강원도 양양 남대천 유역의 지하수 흐름 해석에 적용하였다(그림 3 참조). 양양 남대천 유역은 전체 유역면적이 468km^{2}이고 유로 총연장은 45km이다. 시험 유역내에 있는 6개의 지하수 관측정을 이용하여 지하수 수위 관측자료를 얻을 수 있었다. 넓은 유역에도 불구하고 지하수 관측정이 부족하여 관측결과만으로 유역내 지하수의 전체 흐름 특성을 파악하기에는 용이하지 않았다. 그림 4에는 2개 관측정의 관측자료만 비교하여 제시하였다. 수치모형 모의 결과 지하수위 변동의 양상은 충분히 파악할 수 있었다. 수치모형 모의시 시험유역이 대단히 큰 관계로 유역마다 투수계수, 저류계수, 경사, 토사입경 등 기초자료를 추정하여 수치모형에 도입하였으며 관측결과와 비교하여 대체적으로 양호한 산정결과를 얻었다.

4. 결 론

수자원으로서 밀접한 관계에 있는 지표수와 지하수를 개념적이면서도 물리적으로도 타당한 수치모형 [SIRG]를 개발하였다(건설교통부, 1999). 지표수-지하수 연계 수치모형 [SIRG]는 유역면적 10 km^{2}내외에서만 적용가능한 기존 모형의 적용한계성을 개선하여 다양한 크기와 조건의 유역에 적용이 가능하다. 또한 실시간별 강우자료를 토대로 하천의 수위와 유량 변화 그리고 지하수위 변화에 의한 하천과 지하수와의 연계를 고려할 수 있다.

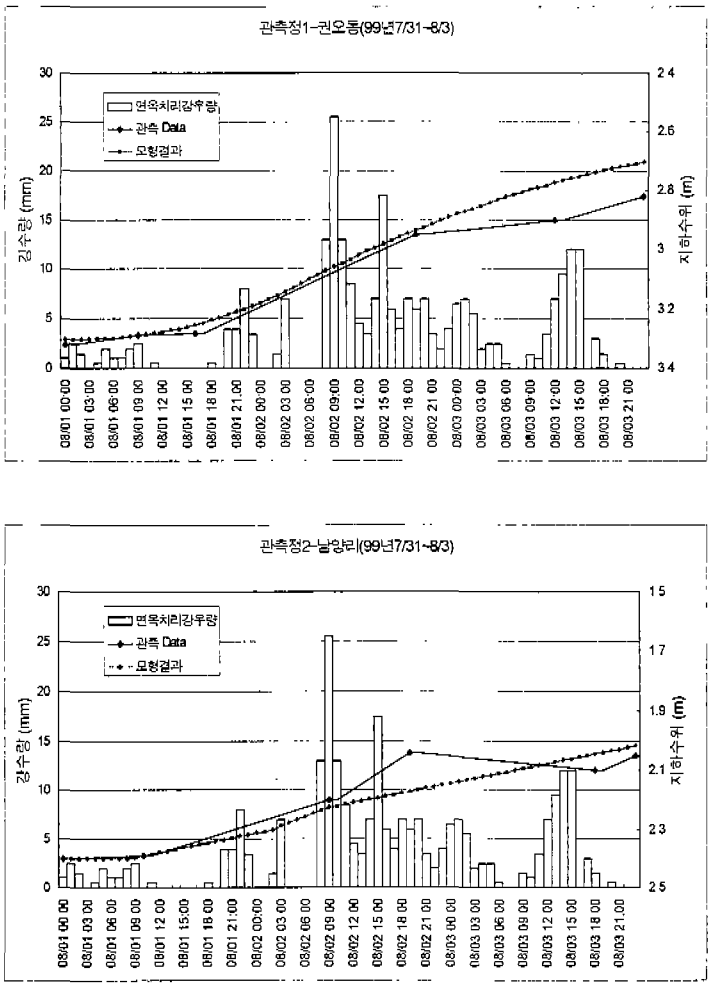

그림 4 지하수 수위의 시간변이

4. 감사의 글

본 연구는 1999년 건설교통부 연구과제인 " 지표수-지하수 연계운영 시스템 개발 "의 일환으로 이루어진 것이며, 이에 감사를 표합니다.

5. 참고문헌

1. Hann, C. T., Barfield, B. J. and Hayes, J .C., "Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments", Academic Press, 1994.
2. Wang, H. F. and Anderson, M. P., "Introduction to Groundwater Modeling", 1990.
3. 건설교통부, 지표수-지하수 연계운영 시스템 개발, 1999.