

地下水の 물 收支에 관한 小考

(증발산량의 推定을 中心으로)

강 관 원
서 병 하

<본협회이사·인하공대 교수>

1. 머릿말

地下水 開發利用이 현금 우리나라 뿐만아니라 세계적으로 큰 관심이 됨에 따라 실로 막대한 水量을 저장하고 있는 地下源을 어떻게 開發하고 또 지역적인 開發可能量을 어떻게 추정할 것인가가 그 重要한 문제점으로 대두되고 있는 것이다. 또한 지금까지 수자원 정책을 수립하거나 수행하는 사람들은 총체적인 수자원 개발에 있어 지하수자원의 개발이 차지하는 비중을 과소평가하거나 무시한 경우가 허다하다.

산업개발정책에 따라 증가되는 공업및 농업용수 뿐만아니라 인구의 급증에 따른 급수년의 해소를 위하여도 지하수자원의 開發은 중요한 의의를 가지는 것이다

지하수 貯留量의 추정방법에는 크게 水理地質學的인 면에서의 力學的 理論에 의한 방법과 기상자료와 地質學的의 자료로서 地下水의 물 收支(Water Balance)를 세워 추정하는 방법으로 나눌 있는데 본 논문에서는 물 收支에 의한 지하수원 평가의 한 방법을 제시하려 한다.

물 收支에 있어 우리가 가장 난점으로 여기는 것은 정확한 증발산량의 추정으로서 河川水理와는 달리 地下水에서는 특히 그의 추정이 몹시 복잡하다. 최근의 문헌을 조사하여 이 증발산량의 추정법에 대해서 필자가 가장 실제적이고 실용성 있는 방법이라고 볼 수 있는 몇가지에 대해서 논하고자 한다.

2. 地下水 資源

地下水 資源은 地下水 貯留體로 부터 획득할 수 있는 물의 量을 말한다. 이들은 원래 무척 多樣하나 主要한 것만을 들여보면 다음과 같음을 알 수 있다.

1) 自然的인 水資源(Natural Resources)

自然的인 상태의 地下水 貯留體로 부터 流出되는 水量

2) 統制的인 水資源(Regulatory Resources)

地下水 涵養기간(recharge period)동안 帶水層에 모이는 물의 총량으로 이것은 사실상 自由地下水面의 變化가 일어나는, 자연적인 지역에 저장되어 있는 물을 가리킨다.

지금 이 部分의 涵의 體積을 V_p 라면 그 속에 함유되어 있는 水量 Q_p 는 유효공급율이 m_e 일때

$$Q_p = V_p \times m_e$$

로 계산된다.

3) 永久的인 貯留量(Permanent Storage)

regulatory resources 밑의 帶水層 전체속에 함유되어 있는 물을 말한다. 즉 자유지하수면에서 수면변동의 下限의 수면 밑에 있는 물로서 이 量 R_s 는 대수층체적을 V_s 라면

$$R_s = V_s \times m_e$$

로 표시된다.

4) 개발가능 수자원(Exploitable Resources)

帶水層으로부터 인공적으로 뽑아낼 수 있는 물의 量을 말한다. 自然的이거나 永久的인 水資源의 모든 물을 뽑아낸다는 것은 不可能하므로 개발가능 水資源은 이 둘보다 적다.

上記의 各 水資源의 量은 두가지面에서 算出할수 있는데 그것은 水力學的으로 地下水 流出量을 算出하는 것과 水文資料와 地質에 관한 資料를 利用한 물 收支로부터 算出하는 것으로서 여기에 서는 물 收支에 의한 算出方法에 대해 개략적으로 論하고자 한다.

3. 대수층의 물 收支

대수층의 水源을 결정하려면 무엇보다도 그 대수층을 정확하게 정의해야 한다. 즉 3개 중요 구성域인 滲

養域(recharge area) 地下水の 流通域(flow zone) 地下流出域(discharge zone)으로 區分할 수 있다. 이들중 주된 부분은 유출域으로서 대수층의 流出地域(out crop area)이다. 그러므로 이 地域에 세심한 주의를 기울려야 한다. 降雨量의 算出에 중요한 有역면적을 정확히 알기 위하여 정확하게 그려야 하며 투수계수가 推算되어야 하고 또 경작지 면적을 알아야 하며 침투량 및 유출량算出에 必要한 地層의 경사도를 알아야 한다.

대수층의 물 收支는 河川流域의 물 收支와 같은 방법으로 세울수가 있다. 그러나 河川流域에서 서로다른 투수계수를 갖은 여러 대수층의 평균 收支이겠으나 여기에서 우리가 알고자 하는 것은 우선 水源인 한개의 대수층에 국한하는 것으로 한다.

지금 일정한시간의 대수층을 생각하여 물 收支를 論하고자 한다. P 를 그 地域에 내린 降雨量이라하고 部分으로 나누어 증발산량을 E , 지하수에 補給되는 浸透量을 I , 表面流出量을 R_s 라고 하면

$$P = E + I + R_s \pm \Delta r \pm \Delta V_s \dots\dots\dots(1)$$

로 된다. 여기서 $\pm \Delta r$ 는 地中에 留保되는 물의 부족량과 과잉량을 나타내고 $\pm \Delta V_s$ 는 地表面上에 남은 水量을 말한다.

地下水體에 침투하는 水量 I 는

$$I = R_n \pm \Delta V_n + R_{nf}'' \pm \Delta V_{nf}'' + R_{nc}'' \pm \Delta V_{nc}'' - R_{nf}' \pm \Delta V_{nf}' - R_{nc}' \pm \Delta V_{nc}' \dots\dots\dots(2)$$

로 표시할수 있는데 여기서

- R_n ; 直接 流出하는 水量
- R_{nf}'' ; 다른 自由地下水體로 間接 流出하는 水量
- R_{nc}'' ; 다른 制限地下水體로 間接 流出하는 水量
- R_{nf}' ; 다른 自由地下水體로 부터 流入하는 水量
- R_{nc}' ; 다른 制限地下水體로 부터 流入하는 水量
- $\Delta V_n, \Delta V_{nf}', \Delta V_{nf}'', \Delta V_{nc}', \Delta V_{nc}''$; 上記 水量의 變化量

그러므로 (1)式은

$$P = E + R_s \pm \Delta r \pm \Delta V_s + R_n \pm \Delta V_n + R_{nf}'' \pm \Delta V_{nf}'' + R_{nc}'' \pm \Delta V_{nc}'' - R_{nf}' \pm \Delta V_{nf}' - R_{nc}' \pm \Delta V_{nc}' \dots\dots\dots(3)$$

로 된다.

萬一 短期間의 물 收支가 아니라 1년에 걸친 물 收支를 論한다면 變化量들은 다소 없어지거나 무시할 수 있다. 그렇지만 이들 變化量들이 매우 크게 될 경우가 많다. 특히 어느해와 다음해의 降雨量의 變化가 클때는 그 量이 매우 커서 무시할 수 없게된다. 이點은 降雨量이 적은 해와 많은 해가 교대로 닥쳐오는 지역에서는 극히 重要하게 된다.

한편 수년동안의 물 收支를 세우면 이들 變化量은

무시할 수 있게 됨으로

$$\begin{aligned} P &= E + I + R_s \\ I &= R_n + R_{nf}'' + R_{nc}'' - R_{nf}' - R_{nc}' \\ \therefore P &= E + R_s + R_n + R_{nf}'' + R_{nc}'' - R_{nf}' - R_{nc}' \\ &\dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

로 된다.

地下水體가 완전히 고립되어서 어느 인접한 대수층으로 부터 전연 물의 交流가 없었다고 하면 (1)式은 간단히 된다.

$$\begin{aligned} P &= E + I + R_s \\ I &= R_n \\ \therefore P &= E + R_n + R_s \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

上記式中の R_n 의 양은 永久的인 水資源量에 해당한다는 것은 자명한 것으로 그의 量을 알려면 직접 R_n 을 測定하거나 물 收支式의 다른 項의 값을 알면 계산할 수 있다. 즉 (5)式의 경우에는 P , E 와 R_s 의 값을 계산하면 된다.

몇개 降雨量 P 는 쉽게 알수있으나 雨量計가 地下水 函養地域에 설치되어 있으면 된다. 그리고 그 地域의 面積을 正確히 計算하여야 한다. 이렇게 하여 대수층위에 降雨의 總量을 알게되며 이에 대기층의 水蒸氣, 이슬뭇 안개가 地面에 응결되는 수량을 加해야 한다.

降雨量이 많은 地域에는 후자의 水量은 무시할 정도이겠으나 다른 水源의 水量에 比하여 降雨量이 매우 적은 사막같은 지역에서는 그렇지 않다. 이러한 지역에서는 2차적인 水源량도 그값 자체는 적을지언정 全體水量에서 보면 비교적 큰 부분을 차지하게 된다. 降雨量은 쉽게 算出될수 있으나 水資源供給에對한 2차적인 水源의 계산은 그렇지 않다. 건조한 地域에서는 2차적인 水源의 比重이 比較的 크기때문에 그지역에서 야기되는 問題點은 매우 힘들게 되는 것이다.

지표면 유출량 R_s 는 江流域에서는 결정하기가 쉬우나 地下水에 있어서는 상황이 아주 다르다. 江流域에서의 流出量은 透水層 및 不透水層의 지역상의 유출량의 총량으로 계산되나 地下水 함양지역에서는 不透水層에서 浸透는 일어나지 않으므로 전술의 流出量을 그대로 적용할수 없는 것이다. 물 收支 방정식의 R_s 의 값은 함양지역에서만 유출량의 값을 고려해야만 한다. 함양지역에서 流出되는 江과 河川으로부터의 流量을 계산하여 이 지역으로 河川과 江으로부터 流入되는 水量을 排除하여야 한다. 이의 계산은 流出量이 적은 지역에서는 比較的 간단하나 不透水層이 많은 지역에서는 精確한 계산은 거의 불가능하다.

또하나의 地下水源의 定量的인 計算上의 난제는 증발산량의 推算이다. 河川流域에서의 그의 산출은 降雨

량과 流出量의 差異로서 推定할수 있으나 이와같이 얻어진 증발산량은 평균지일 뿐이므로 地質構造에 따라 달라지는 地下水 問題에서는 이값을 그대로 사용할수는 없는 것이다. 더군다나 河川流域에서 얻어진 증발산량은 透水層과 不透水層을 포함한 全流域에서의 산출량이므로 實際的으로 必要的인 帶水層의 물收支에서는 地下水 함량지역만의 地質과 재배식물에 따른 증발산량이므로 엄격한 의미에서 不適當하다.

이상에서 地下水의 물 收支에 대해서 河川水理와의 차이점을 들어 간단히 비교하였는데 다음에는 각 項目別 計算方法 및 메타의 처리 방법에 대해 간추려 보기로 한다.

1) 降雨量

地下水 함량지역에 내린 강우량이 무엇보다도 중요한 바 이량은 地表面에의 강우량에서 증발산량과 流出量을 減한 값이 된다. 이로부터 지역面積을 곱하면 降雨에 의한 地下水 補給量이 계산되는데 이는 降雨強度에 크게 좌우된다.

地下水 問題에서는 일강우량, 월강우량 및 년강우량도 알아야 할 필요가 있으나 계절적인 영향을 많이 받기 때문에 계절에 따른 降雨量이 水理地質學的인 면에서 더 重要하다.

地域의 降雨量의 分布가 불규칙적일때 주어진 지역에서 降雨量을 계산하는 방법에는 주로 Isoheytal Method 와 Thiessen Method 가 利用되고 있는데 전자는 平均 降雨量에 의한 等降雨量線圖를 그려 等雨線間의 面積을 求하여 곱하므로써 강우량을 산출하는 것이고 후자는 降雨測定 지점별로 區域을 나누어 區域面積과 측정 지점의 降雨量을 곱하므로써 강우량 산출을 하는 방법이다. 降雨量算定에 무엇보다도 중요한 것은 가능한한 많은 곳에서 降雨量을 測定하는 것이라는 것을 부연해둔다.

2) 증발산량

증발산량의 算定方法은 Blaney, Hedke, Penman 등의 여러가지 방법이 있으나 본 논문에서는 가장 유용하고 실제적인 방법이라 볼수 있는 것에 대해 논하고자 한다.

(1) Thornthwaite 의 方法

우선 실제증발산량과 증발산산위를 區別해야 한다. 우리가 알고자 하는 것은 실제 증발산량이다. 이것은 직접 算出하기는 어려우나 증발산위는 비교적 쉽게 계산할 수 있다. 월 증발산사위 e 를 算定할 수 있는 方法의 하나로 다음 Thornthwaite 에 의한 식이 있다. 즉

$$e = 1.6 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \dots \dots \dots (6)$$

여기서 t ; 월평균기온($^{\circ}C$)

I ; 연 열지수(heat index)

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.7921 \times 10^{-2} I + 0.492390$$

이때 I 와 a 는 t 의 함수이다.

월 열지수를 i 라면 12개월동안의 월별 i 의 값을 합하므로써 I 를 구할수가 있다. 그런데

$$i = \left(\frac{t}{5} \right) 1.514 \dots \dots \dots (7)$$

로 표시되므로 이식으로서 월 열지수를 산출하여 I 를 구할수 있으며 따라서 a 의 값도 얻어지는 것이다.

이와같이 하여 얻어진 값은 위도에 따른 보정계수를 곱하여 증발산위를 구하게 된다.

실제 증발산량은 증발산위와 강우량을 利用하여 다음과 같은 방법으로 산출한다.

① 各月の 강우량이 증발산위보다 클때에는 실제 증발산량은 증발산위와 같다.

② 증발산위가 강우량보다 클때에는 실제증발산량은 강우량의 깊이(mm)와 土中留保水量으로부터 損失된 물의 깊이(mm)와의 습이된다.

③ 土中留保水가 충분하지 않을 때에는 실지 증발산량은 강우량과 前月에서 남겨진 留保水와의 습이 된다

④ 土中留保水가 0이면 실지 증발산량은 강우량과 같게된다.

土中留保水量이 最大가 될때에 증발산량을 除한 降水量 일부는 침투하여 地下水에 補給되며 나머지는 표면 유출로서 흘러나간다. 이들 두부분의 관계를 결정하는 일반적인 법칙은 없다.

Thornthwaite 는 最大 土中留保水를 100mm 로 가정하였으나 이 값은 흙의 종류에 따라 다르다. 岩盤으로 된 흙에서는 50mm 程度밖에 안되지만 어떤종류의 흙에서는 200~300mm 까지 달할경우가 있다.

(2) Serra 의 公式

Serra 는 월 증발산위 e_m 을 다음식에 의해 계산한다고 하였다. 즉

$$e_m = 22.5 \left(\frac{1 - \epsilon_n}{0.25} \right) \left(1 - \frac{\tau^2}{1000} \right) e^{0.0644t_n} \text{ (mm)} \dots \dots \dots (8)$$

여기서 n ; 월을 가리키는 수(1~12)

τ ; 연평균기온과의 차이의 최대값

t_n ; 월 평균기온

ϵ_n ; 월 평균습도

Serra 의 공식은 증발산위만을 구하는 식이므로 실지

증발산량은 전술의 Thornthwaite의 과정을 거쳐 산출한다.

(3) Turc의 공식

이 식은 여러나라의 수많은 연구자들에 의해 행해지고 기후가 서로 다른 지역에서 실시된 실험의 결과로서 얻어진 실험식이다. 월 증발산량은

$$e = 0.40 \frac{t}{t+15} (I_g + 50) \quad (\text{mm}) \dots \dots \dots (9)$$

로 주어지며 여기에서 t 는 해당월의 평균기온(°C)를 말하고 I_g 는 그 월의 일평균 복사량(cal/cm²)을 가리킨다.

(4) white의 방법에 의한 증발산량측정

이 방법은 自由地下水에만 적용된다. 이것은 지하수위의 變動狀態를 관찰하여 증발산량을 추정하는 것으로 24시간동안 식물에 흡수되어 발산된 水量은

$$q = m_e(24R + S) \dots \dots \dots (10)$$

로 표시되며 여기에서

q : 24시간동안 식물에 흡수되고 증발된 水量 (mm)

m_e : 유효 공극률

R : 0시~4시 사이에 지하수위 증가량의 시간평균치(mm)

S : 24시간동안의 지하수위의 변동량(mm)

밤중의 지하수위의 상승은 발산이 없는 기간동안의 지하수 보급을 뜻한다. 지하수위 변동은 물의 運動에

필요한 에너지의 총량과 포화대수층의 두께에 比하면 적기 때문에 水位圖에 나타난 최대 水位 상승률은 水位변동지역내에서의 dewatering 율에 같게된다. 그러므로 증발산량은 최대수위 상승률에 포화층의 공극면적을 곱하므로써 근사적으로 구할수 있다. 일정시간의 지하수위 변동곡선에서 수위상승률과 수위변동량을 각각 $\Delta h_1/\Delta t_1$, $\Delta h_2/\Delta t_1$ 이라던 증발산량의 시간변동량은

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{\Delta h_1}{\Delta t_1} \pm \frac{\Delta h_2}{\Delta t_1}$$

대수층의 공극율을 m 이라던 증발산량은

$$q = m \left(\frac{\Delta h_1}{\Delta t_1} \pm \frac{\Delta h_2}{\Delta t_1} \right) \dots \dots \dots (11)$$

로 될것이다. 장기간의 증발산량은 위의 방법으로 일 증발산량을 구하여 그의 습을 구하면 얻을수 있다.

전술의 증발산량 계산방법들은 서로 산출방법이 다소 틀리므로 좀더 지역에 알맞은 값을 얻기 위하여는 각 방법에 의한 계산결과와 실측치를 비교하여 결정하여 야한다.

4. 맺는말

지금까지 論한 地下水의 물 收支와 그 中の 증발산량 推算方法이 우리나라 地域의 水文資料와 그 地域의 地質學的인 特性을 적용 할 경우의 타당성 여부를 水文調査를 위한 代表流域에서 실측된 資料로서 判斷할 수 있는 기회가 주어지기를 바라며 끝을 맺는다.

<p. 50에서 계속>

無害한 流下를 確保하기 爲해, 工作物의 特別한 管理 其他 必要한 規制를 하기 爲한 規定을 만들 義務를 州에 課하는 데 있다(第32條).

(9) 利水 大綱 計劃

이 計劃은, 利水 條件 確保를 爲하는 基本 計劃이며 河域, 經濟圈 또는 그 部分에 對해 廣域의으로 作成되어야 한다. 그것은 特定 目的을 爲해 하는 具體的 利水 計劃을 定하는 技術的 計劃이 아니라, 오히려 貯水 汚濁 防除, 洪水 防除 등을 考慮한, 물의 廣域의인 管理의 基礎이며, 具體的 利水 方法의 決定이 이에 따라 行해져야 하는 一般的 利水 計劃이다. 이러한 計劃은 情勢의 變化에 恒常 即應할 수 있는 強力性을 가지는

同時에, 國土 計劃과 調和시켜야 되는 것이나 몇개의 州에 及칠 可能性이 큰 廣域의 計劃이므로, 그 作成에 關한 方針은 聯邦政府가 決定하며, 州는 여기에 따라 計劃을 作成한다(第36條).

(10) 물臺帳

물 臺帳의 制度는, 現在도 州에 따라서는 存在하는 곳이 있으나, 普遍的이 아니므로, 法律은 各州를 通하여 統一의으로 이를 整備할 것을 命하고 있다. 물의 管理를 爲해서는, 물 利用의 主體의 數, 內容, 特別 保護 措置, 地域의 現狀 등이 恒常 把握되어 있는 것이 必要한 때문이다. 물 臺帳 登錄의 法律的 效果를 어떻게 定하는가는 州의 法律에 一任되어 있다.