

마산만 유역의 지하수 유출량 추정 Estimation of the Groundwater Discharges in Masan Bay Watershed

양정석* · 조홍연** · 정신태*** · 김상준****

Jeong-Seok Yang*, Hong Yeon Cho**, Shin Taek Jeong*** and Sang Jun Kim****

요 지 : 마산만 연안유역의 지하수 유출량을 Darcy 방법을 이용하여 추정하였다. 지하수위, 관정의 위치, 투수 계수, 대수층 두께, 해안선 길이 정보를 이용하여 추정한 지하수 유출량은 강우량 대비 1.65% 정도이다. 마산만 유역의 암반층을 통한 지하수 유출량은 $0.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$ 정도로 추정되었으며, 충적층을 통한 지하수 유출량은 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{year}$ 정도로 추정되어 암반층을 통한 유출량은 무시할 만한 정도로 파악되었다. 한편, 한국해양연구원(2003)에서 방사성 동위원소를 이용하여 추정한 지하수 유출량은 본 연구에서 추정한 지하수 유출량의 20배 정도에 해당 하지만, 이는 연안 대수층으로 침입한 재순환 해수의 영향으로 파악되었으며, 해안선에 근접한 관측정의 운영을 통하여 지하수위 및 염도 변화를 지속적으로 관측하여 재순환해수의 정량적인 영향분석을 보다 상세하게 연구할 필요가 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 지하수 유출량, 대수층, 관정, 마산만, 재순환해수, Darcy 방법

Abstract : The discharges of groundwater flow were estimated using Darcy's method along the coastal zone in the Masan Bay. The estimates using the information, i.e., groundwater level, location of the observation well, hydraulic conductivity, the thickness of the aquifer, and coastline length, were 1.65% of the precipitation of the watershed. The estimated groundwater discharges through fractured rock aquifer and the aquifer with sedimentary material were $0.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$ and $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{year}$, respectively. Whereas, the discharge estimated by KORDI (2003) using isotopes method is about 20 times larger than the estimates from this study because of the influence of the re-circulated seawater through the coastal zone aquifer. In order to quantify this effect in detail, the groundwater levels and salinity changes in the observation wells located in the coastal zone should be continuously monitored and analyzed.

Keywords : groundwater discharges, aquifer, observation well, Masan Bay, re-circulated water, Darcy's method

1. 서론 - 연구의 필요성 및 목적

연안해역의 흐름은 조석 및 파랑, 바람, 유역에서 유출되는 하천의 유량(수량)에 의하여 영향을 받는 물리적인 특성으로 표현되며, 연안해역의 오염물질 확산양상은 해역의 물리적인 특성과 유역 오염부하량에 의하여 직접적으로 영향을 받게 된다. 연안해역의 환경상태는 오염부하량의 시간적·공간적인 변화와 밀접한 관련이 있기 때문에 환경변화 양상을

정확하게 추정·예측하기 위해서는 해역의 물리적인 특성과 연안유역의 오염부하량 특성을 동시에 고려하여야 한다.

그러나, 연안해역의 물리적인 특성분석 및 오염물질 확산범위를 예측하는 연구에 비하여 연안유역의 오염부하량 추정에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 특히, 오염부하량 산정에 필수적인 인자에 해당하는 수량 및 수질에 관한 정량적인 연구는 오염물질의 농도분석으로 제한되어 오염부하량 산정이 매우 곤란한 실정이다. 한편, 하천의

*서울대학교 지구환경시스템공학부(Division of Civil Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University)

**한국해양연구원 연안항만공학연구본부(Corresponding author, Coastal and Harbour Engineering Research Division, Korea Ocean R & D Institute, Ansan P.O. Box. 29, Seoul 425-600, Korea. hycho@kordi.re.kr)

***원광대학교 토목환경도시공학부(Wonkwang Univ., School of Civil, Environmental and Urban Eng.)

****경원대학교 토목환경공학(Kyungwon Univ., Department of Civil & Environmental Engineering)

지표수(surface water) 유출특성에 관한 연구 및 정량적인 분석 연구는 부족한 실정이지만 최근 이에 관한 연구가 활발하게 수행되어가고 있는 실정이다(한국해양연구원, 2000). 그러나, 지하수 유출 특성 및 경로추정에 관한 연구는 유출양상이 복잡하고, 가시적인 흐름파악이 곤란하고, 지하수 유출량 추정을 위한 자료부족 및 상당한 관측비용이 요구되어 연구성과가 매우 미흡한 실정이다. 한국해양연구원(2002, 2003)에서는 마산만 유역의 지하수 유출량을 물수지 분석 방법, Darcy 방법 및 방사성 동위원소를 이용한 방법을 이용하여 추정한 바 있으나, 추정결과의 상대적인 비교 및 한계분석에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

연안유역의 담수 유출량은 지표수 유출량이 대부분을 차지하고 있으며 지하수 유출량이 차지하고 있는 부분은 5.0% 정도로 추정되고 있다. 그러나, 시기적으로 유역 지표수 유출량이 적은 동계에는 지하수에 의한 유출량 비율이 10.0% 정도로 증가하는 경우도 있다(한국해양연구원, 2002). 도시 유역 지하수의 오염물질 농도가 지표수에 비하여 매우 높은 농도를 보이고 있는 연구결과가 보고되는 있는 실정이므로, 유역에서의 오염부하량을 적절하게 추정하기 위해서는 지표수를 통한 오염부하량과 지하수를 통한 오염부하량이 모두 고려되어야 한다(한국해양연구원, 2000, 2002, 2003).

본 연구에서는 연구성과가 매우 미흡한 연안 유역에서의 지하수를 통한 유역 오염부하량 추정을 위한 기본 단계로 마산만 연안 유역의 지하수 유출량 추정에 중점을 두어 수행하였다. 지하수 유출량 추정은 지하수 흐름이론에 근거한 Darcy 방법을 이용하였다. 지하수 유출량 추정은 여러 인자를 보다 종합적으로 고려한 상용 지하수 흐름모형 등을 이용하여 추정하는 방법(부성안, 정교철, 2000; 박남식, 이응두, 1997)도 있으나, 모형의 입력자료 수준이 연안유역 지하수 유출모형 적용에는 무리가 있는 것으로 사료되어, 본 연구에서는 모형의 입력자료 수준을 감안하여 Darcy 방법을 선택하였다. 모형이 복잡도가 증가하면 다수의 입력매개변수를 요구하며, 입력 매개변수가 증가할수록 모형의 불확실성(uncertainty)도 동반하여 증가하게 된다. 따라서, 복잡한 모형을 선택하여 적용하는 방법보다는 가능한 입력자료의 수준을 감안하여 가장 적절한 모형을 선택하는 방법이 최적의 방법이라 판단되어 Darcy 방법을 선택하였다.

2. 이론적인 배경 - 산정방법

2.1 지하수 유출량 추정방법

지하수 함양지역(recharge area)으로 유입된 지하수는

하천, 저수지, 해안선 지역 등을 통하여 유출된다. 지하수 유출량 추정은 유역의 물수지 분석을 통한 방법, 지하수 수리학 이론에 근거한 Darcy 방법, 방사성 동위원소를 이용하는 Tracer 방법 등이 이용되고 있다(김규한, 1982; Krest & Harvey, 2003; Moore & Arnold, 1996). 물수지 분석 방법은 유역으로 유입되는 수량과 유출되는 수량이 장기적(최소한 월, 연단위)으로 평형을 이루고 있다는 가정을 근거로 적용되는 방법이다(조홍연, 2002). 유역으로 유입되는 수량은 강수량, 상수도를 통한 유입량(타수계에서 공급되는 용수량)이며, 유역에서 유출되는 수량은 유역의 증발산량, 하천을 통한 유출량, 지하수를 통한 유출량, 하수도를 통한 유출량이다. 여기서, 지하수를 통한 유출량을 제외하고, 유역의 모든 유입수량과 유출수량을 적절하게 추정하고, 그 차이를 지하수를 통한 유출량으로 간주하는 방법이다. 이 방법은 지하수를 통한 유출량이 하천을 통한 유출량 및 유역의 증발산량의 추정량에 매우 민감하게 반응하기 때문에 하천 유출량 및 유역 증발산량에 대하여 적절하고 정확한 추정이 선행되어야 한다. 그러나, 마산만 유역은 지하수 유출량 추정에 중요한 인자에 해당하는 증발산량 추정 정보가 매우 미흡하여 정확한 지하수량 추정이 곤란한 실정이다.

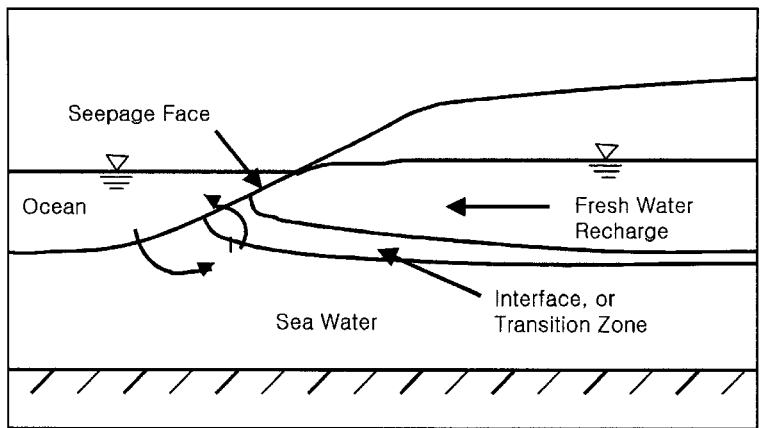
한편, 방사성 동위원소를 이용한 방법은 추적자(tracer)를 이용한 방법으로 지하수 유출경로 및 평형상태를 가정하여 지하수 유출량을 추정할 수 있으나, 분석비용 및 단기적인 유출량 추정에 한계가 있다. 그러나, 최근 지하수 연구에 활발하게 이용되는 방법이다(한국해양연구원, 2003; Kelly & Moran, 2002; Basu et al., 2001; Brenner et al., 2000).

반면, 지하수 유출량 추정에 공학분야에서 활발하게 이용되고 있는 Darcy 방법은 지하수 수리학 이론에 근거한 방법으로 물수지분석 방법과 같은 개념적인 방법과 상반되는 방법이다. 이 방법은 지하수의 흐름이론에 근거하는 방법이기 때문에 물리적인 분석 및 의미부여가 가능하며, 유역 환경변화에 따른 지하수 유출량 변화예측도 가능하다. 본 연구에서는 Darcy 방법(선우중호, 1983; Smith & Wheatcraft, 1993; WMO, 1994)을 이용하여 마산만 연안유역의 지하수 유출량을 추정하였다(Fig. 1 참조).

Darcy 방정식은 다음과 같이 표기된다.

$$Q = \left(-K \frac{dh}{ds} \right) A \quad (1)$$

여기서, $Q(\text{m}^3/\text{s}$ 또는 $\text{m}^3/\text{day})$ 는 대수층을 통한 지하수 유출량, $K(\text{m}/\text{s}$ 또는 $\text{m}/\text{day})$ 는 대수층의 투수계수(hydraulic



(Ref.) 1. Re-circulated seawater

Fig. 1. Schematic diagram of the groundwater flows in coastal zone(Smith & Wheatcraft, 1993).

conductivity)로 속도차원을 가지며, 지하수가 흐르는 대수층(aquifer)의 투수성능을 반영한다. $A(m^2)$ 는 지하수의 흐름 단면적으로 하천이나 저수지로 지하수가 유입되는 경우에는 지하수층(포화층, saturated layer)의 두께(m)에 하천의 길이 또는 저수지의 윤변(perimeter)을 곱한 값이고, 해안선을 통하여 지하수가 유출되는 경우에는 지하수층(포화층)의 두께에 해안선의 길이를 곱한 값이다. 해수楔기층(saline wedge layer)이 존재하는 연안유역에서는 포화층의 두께가 아니라 담수층의 두께를 사용해야 한다. 한편, dh/ds (무차원)은 동수경사로 지하수위(GWL, groundwater level)의 흐름방향 변화률이다.

2.2 추정에 필요한 입력자료

2.2.1 지반조사

지하수는 대수층을 통하여 흐른다. 이 대수층은 크게 층적층에서 발달한 경우와 암반에서 파쇄대(fracture zone, 암반의 갈라진 틈)를 중심으로 발달한 경우로 분류할 수 있다. 대수층에 대한 정보는 지하수 흐름을 분석하는데 있어 필수적인 항목으로, 주로 관측정보로부터 얻어진 시료(core sample)와 지구물리학적 탐사에 의하여 구해진다. 깊이에 따른 시료를 얻기 위하여 많은 관측정을 굴착하는 것은 경제적으로 부담이 되며, 특히 암반 대수층의 경우는 비용이 상당히 들기 때문에 몇 개의 관측정에서 시료를 얻으면서 물리탐사를 병행하는 것이 효율적이다. 지하수 연구에 도움을 주는 물리탐사 방법에는 탄성파탐사, 전기탐사, 전자기탐사 등이 있다(Fetter, 1994). 이 중에서 가장 많이 쓰이는 방법은 전기탐사로서 물질의 고유한 성

질인 비저항(resistivity) 수치를 지하 단면에서 영상화할 수 있는 방법이다. 이 방법은 전기탐사를 통하여 얻어진 자료를 비선형 최적화 기법인 역산과정(inversion)을 통하여 비저항의 3차원 분포를 추정하는 방법이다. 전기탐사는 전극을 지표면이나 관측정 내에 설치하고 전류전극 간에 전류를 흘리고 전위전극 간의 전위 차를 측정하여 전류전극과 전위전극의 위치에 따른 기하학적 요소를 고려하여 겉보기 비저항(apparent resistivity) 수치를 계산하는 것이다. 이 겉보기비저항 수치는 역산과정을 통하여 비저항 수치의 공간분포를 추정하는데 쓰이게 된다. 이와 같은 방법으로 추정된 비저항 수치 분포와 관측정보로부터 얻어진 시료를 근거로 대수층의 기하학적 정보(위치)와 매질에 대한 정보(지층분포도; 토양도)를 얻게 된다.

2.2.2 수리학적 매개변수

Darcy 법칙에서 소개된 투수계수(hydraulic conductivity) K 와 저류계수(storage coefficient) S 는 지하수 흐름을 해석하는데 있어서 기본적으로 제공해야 하는 매개변수이다. 투수계수는 어떤 매질이 얼마나 유체를 잘 통과시킬 수 있는지에 대한 척도로서 지하수 흐름에 가장 중요한 영향을 미치는 인자이다. 저류계수는 매질이 얼마나 지하수를 공급할 수 있는지에 대한 척도이며 이 또한 중요한 인자이다. 투수계수와 저류계수는 양수시험을 통하여 얻을 수 있으나 양수시험에 의하여 구해진 매개변수는 양수정을 중심으로 어느 정도 떨어진 공간을 평균한 값이다. 규모가 큰 대수층에서는 양수시험을 통하여 얻은 매개변수를 사용하여 국지적으로 매개변수 값이 균질하다고 가정

하고 수치모의를 할 수 있지만, 규모가 작거나 비균질 대수층에서는 앞에서 설명한 지반조사 단계에서 구해진 비저항의 분포와 지층시료를 이용하여 투수계수의 분포를 추정하여야 할 것이다. 투수계수의 분포는 지하수 흐름 수치모의와 대수층에서의 오염물질 이동 예측에 필수적인 요소이므로 이에 대한 정보의 수준(data & information quality)에 따라 추정결과와 신뢰성이 결정된다고 할 수 있다.

2.2.3 지하수위의 공간분포 자료

Darcy 법칙에서 지하수위는 흐름의 존재를 결정하는 요소이며 수위변동에 따라서 유속이 결정되므로 유역 내의 관측정에 수위계를 설치하여 지속적으로 측정하는 것이 필요하다. 또한, 수위분포자료는 지하수 등수위(iso-GWL) 분포를 추정할 수 있을 정도로 충분하여야 하며, 부족한 경우에는 지하수 흐름방향을 최단거리의 해안방향으로 가정하여 1차원 흐름으로 해석하는 방법이 대안으로 이용될 수 있다.

3. 마산만 유역 특성

3.1 유역개황 및 기상특성

마산만 유역은 창원시, 마산시를 포함하는 지역으로, 해안선은 12.6 km이며, 토지구성은 총 296 km² 중 임야(산지유

역) 130 km², 전답 74 km², 대지 17 km², 기타 73 km²이다. 또한, 마산만으로 유입하는 창원유역의 하천은 내동천, 창원천, 남천, 마산유역의 하천은 산호천, 장군천 등으로, 지방 2급 하천 규모에 해당하는 하천으로 지속적인 수량 및 수질관측이 시행되지 않고 있는 지역이다(Fig. 2 참조). 이 유역의 평균 기온은 약 15°C, 연평균 강수량은 1,399 mm이다. 최근의 연최대 강수량은 1999년의 2,209 mm, 연최소 강수량은 1994년의 814 mm로 연변화가 매우 큰 양상을 보이고 있다.

지하수 관리 기본계획에 의하면, 지형 및 수문지질 특성이 유사한 지역과 주요 하천, 댐, 수위표 설치 지점을 참고로 하여 전국을 78개의 지하수 소유역으로 구분하고 있다(건설교통부, 1996). 이러한 지하수 소유역은, 주요 지하수 관련 정보를 취합하고 정리하기 위한 기본 단위로 활용되고 있으며, 특히 소유역을 기준으로 지하수 부존 특성을 평가하고 개발 가능량 및 이용량 등을 산정하고 있다. 마산만이 포함된 남해안 지역은 1개 소유역으로 구분되어 있으며, 구분된 소유역의 해당수계, 면적 등에 관한 상세한 사항과 소유역에 대한 행정 구역의 분포 비율이 제시되어 있다(Table 1 참조).

3.2 지형(토양)특성

우리나라 층적층은, 대체로 사층, 역층 또는 이의 혼합체인 사력층과 같은 대수층과 점토층, 실트층과 같은 난

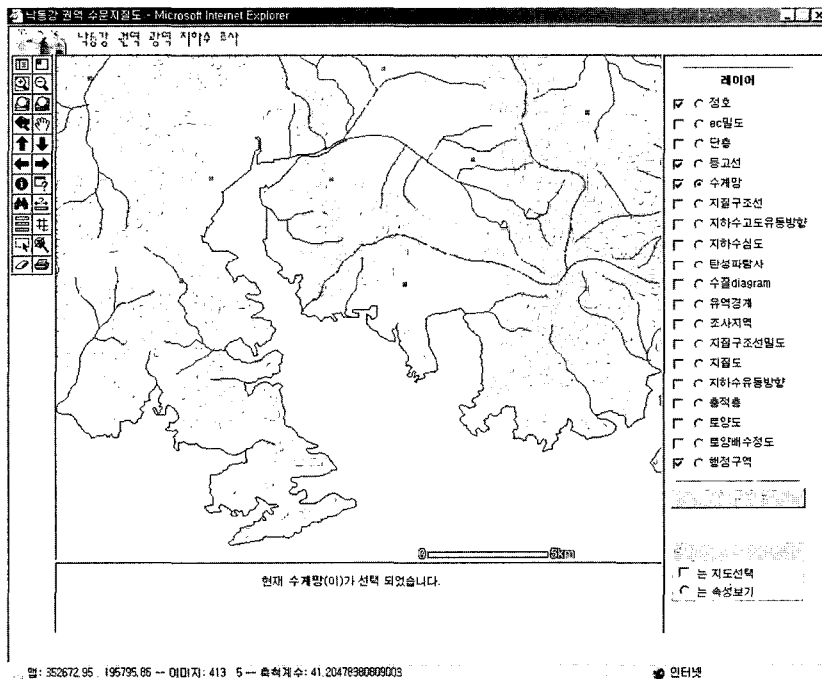


Fig. 2. Topography and river networks in Masan bay watershed.

Table 1. Province of the South-coast watersheds, Nakdong river basin

대유역	소유역	해당 수계	소유역면적 (km ²)	해당시도	해당시군구	시군구 분포 비율(%)
남해안	ST2	섬진강하구- 낙동강하구	2,405.7 도시 지역 제외 (1,488.6)	부산	강서구	0.3
				경남	통영시	7.2
				경남	고성군	26.4
				경남	마산시	18.3
				경남	사천시	22.6
				경남	진주시	2.0
				경남	진해시	7.2
				경남	창원시	8.4
				경남	하동군	7.6

대수층으로 구성되어 있고 각종별 구성 성분 또한 매우 다양한 것으로 나타나 있다. 충전층이 갖는 지하수 함양성이란 측면에서 볼 때, 충전층의 분포 면적과 깊이 및 공극률, 공극 연결성 등은 중요한 요소이지만, 이와 더불어 점토, 미세한 실트 등에 의해 형성된 지층의 퇴적 구조 및 분포 역시 중요한 요소이다. 이러한 낮은 투수성 지층은, 층상으로 충전층 내에 형성되는 경우, 투수성을 저해하고 하부 대수층과의 연결을 차단하여 충전층 지하수 유동에 지장을 주기도 한다. 지하수가 충전층내 공극 속에 저장되고 유동이 용이하기 위해서는 공극률과 더불어 공극의 연결성이 양호하여야 한다. 특히, 충전 대수층의 지하수 산출량은 그 대수층의 비산출률에 따라 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다. 1967년까지 조사된 우리나라 충전층에 대한 분석에 의하면 충전층의 깊이는 평균 7m이며 (농림부·지하수개발공사, 1967) 구성층별 두께와 지하수의 함양량 및 채수가능량을 판단하는 기준인 공극률과 비산출률을 계산한 결과를 제시하였다(Table 2; 한국수자원공사, 1995).

낙동강권역 남해안 유역은 하천의 유로가 짧고 침식·퇴적 작용이 활발한 만곡부 발달이 미약하여, 상대적으로 충전층 발달도 양호하지 않은 것으로 알려져 있다. 본 소유

역의 충전층은 다천천, 사천강의 일부 충전층을 제외하고는 심도(충전층의 두께)가 10m를 넘지 않는 것으로 알려져 있으며, 대부분의 가용 채수량이 300 m³/일 이하로 보고되어 있다. 마산만이 포함된 낙동강권역에 속하는 남해안 유역 ST-2 유역의 충전층 지하수 산출특성은 Table 3에 제시하였다(한국수자원공사, 1996).

3.3 유출 특성 - 토지피복인자(토지이용도)

지표수문을 결정하는 중요한 요인인 토양, 식생, 토지이용 등은 강우시 유출 및 증발산 특성 뿐 아니라 지하수 함양에 직접적으로 영향을 끼친다. 즉, 토양의 공극 특성은 강우의 지하로의 침투 및 저류성을 결정하게 되며, 숲과 삼림 등의 식생은 지표수의 유출을 방지하고 적설을 유지시키고 지표면으로부터의 증발을 억제하며, 충전된 지하수의 저류기간을 연장시켜주는 역할도 한다.

토양은 강우에 의한 유출과 지하수 함양을 위한 수분함유능력을 좌우하며, 이러한 특성은 토양의 유출율과 투수율에 의하여 좌우된다. 농촌진흥청 식물환경연구소에서 발간한 1/250,000 축척의 토양도에 의하면 지형(경사), 토성 및 배수 정도에 따라 토양분류가 이루어졌다. 본 조사에서는 식물환경연구소의 토양도를 기초로 소유역별 토양

Table 2. Basic information of the aquifer in Korea

층별	평균 두께 (mean thickness)		공극률 (porosity)		비산출률 (specific production rate)	
	두께(m)	%	공극률(%)	가산치(%)	비산출률(%)	가산치(%)
점토층	1.88	26.9	56	14.8	2	0.5
실트층	0.22	3.2	45	1.4	5	0.2
사층	1.35	19.3	35	6.8	22	4.2
사력층	1.75	25.0	32	8.8	22	5.5
전석층	1.79	25.6	30	7.7	15	3.8
합계	6.99	100.0		38.7		14.2

*참고문헌: 농림부·지하수개발공사, 1967; 한국수자원공사, 1995

Table 3. Potential pumping rates in South-coast watersheds, Nakdong river area

소유역 (Sub-basin)	하천명 (Rivers)	층적층심도 (sedimentary-layer thickness) (m)	사력층두께 (sand-layer thickness) (m)	가채수량 (potential pumping rate) (m ³ /일)	투수량계수 (transmissivity) (m ² /일)	
낙동강 권역 (남해안)	ST-2	화강천	4.7	3.7	515	1,310
		구만천	5.4	4.9	72	115
		남동천	6.6	6.3	60	-
		남산천	5.2	4.8	220	1,790
		다천천	35.8	35.3	10	-
			6.0	5.5	70	-
		7.5	7.1	115	365	
		봉현천	6.4	5.7	25	-
		5.0	4.6	415	25	
		사천강(주교천)	15.2	14.8	35	165
		삼가천	5.6	5.0	0.5	-
		압전천	6.8	6.4	360	-
요천	5.8	4.9	360	-		

Table 4. Hydraulic conductivity of soil type

대체적인 토성 (Soil type)	투수성 (Permeability)	통과시간 (hydraulic conductivity) (cm/hour)
세식질토(fine clay)	매우 느림	< 0.1
식질토(clay)	느림	0.1~0.5
식양질토(clay loam)	약간 느림	0.5~2.0
양토(loam)	보통	2.0~6.0
사양토(silty-sandy loam)	약간 빠름	6.0~12.0
양질사토(sandy loam)	빠름	12.0~25.0
사토(sand)	매우 빠름	> 25.0

의 투수성과 배수성을 분석하였다.

일반적으로 토성(토양 입도에 의한 특성)에 따른 토양의 투수성은 다음(Table 4)과 같이 분류되고 있는데, 이러한 분류기준은 전형적인 균질 토양을 대상으로 설정된 것인 반면에 실제 일반적인 토양은 다양한 입도분포를 갖는 비균질 매체이므로 본 토양분류에 이러한 기준을 적용하기에는 일부 제약성이 있다.

토양의 투수성은 토양 입도의 특성에 따라 사질, 사양질, 미사사양질, 미사식양질, 식양질, 식질, 돌 및 자갈이 있는 식양질, 용암류, 암석노출지 등의 등급으로 구분할

수 있으며, 토양의 투수성을 기준으로 분석한 낙동강권역 남해안지역 토양 분포비는 Table 5와 같다.

4. 지하수 유출량 추정 및 분석

4.1 지하수 유출량 추정 입력자료

지하수위 조사는, 지하수위 관측망을 합리적으로 구성하여 정기적으로 수위를 관측함으로써 기초 지하수문 자료를 제공하여 주며, 지하수 부존 특성과 변동 상황을 파악하게 하여주는 가장 기초적인 지하수 조사 분야이다.

지하수 해안 유출량을 Darcy의 법칙으로 산정하려면 위에 나열된 변수에 대한 자료가 필요하다. 위에서 중요한 요소는 동수경사(hydraulic gradient)인데 해안선에서 가까운 관정의 수위로부터 다음 식 (2)를 이용하여 추정할 수 있다.

$$\frac{dh}{dl} \approx \frac{H_0}{L} \tag{2}$$

여기서, H_0 는 관측정이 위치한 지점에서의 지하수위(m)이며, L 은 해안선에서 관측정까지의 거리(m)이다. 수위 측정용 관정(observation well)이 해안선으로부터 멀리 있

Table 5. Soil distribution of the South-coast watershed, Nakdong river area

소유역 (Sub-basin)	Sandy loam, Fine sandy loam-Sandy loam	Sandy loam -Clay loam	Silty clay loam -Sandy loam	Clay loam -Sandy loam	Clay -Sandy loam	Rock outcrops
남해안(ST2)	0.5	42.0	14.8	25.5	1.6	15.6

*Reference: 지하수관리기본계획(1996, 건설교통부)

거나 관정과 해안선 사이의 대수층 구조에 변화가 크면 동수경사가 그 지역을 대표한다고 볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 가급적 해안선에 가까운 지점의 지하수위를 사용하였다.

지하수위 조사는 단기간에 많은 관측공을 관측하여 조사 지역의 전체적인 지하수위 특성과 유동성을 파악할 수 있는 지하수위 일제 조사와 특정 지역의 지하수위를 장기간, 정기적으로 관측하여 수위 변동 특성과 대수층 특성을 파악하는 장기 지하수위 조사로 구분할 수 있다. 본 마산, 창원 지역의 마산만 지역의 지하수위 조사에서는 ① 낙동강권역 광역 지하수 조사연구에서 조사된 지하수위(2000년 4회), ② 국가 지하수 관측망 장기 관측 자료 분석(1997-1998년), ③ 해안지역 조석효과 조사 등을 수행하였으며, 이를 토대로 광역 지하수위 특성을 분석·도출하였다.

국가 지하수 관측소 가운데 1998년까지 설치가 완료된 관측소는 낙동강권역에 33개가 위치한다. 26개 관측소에는 암반 및 충적층 관정이 설치되었으며, 나머지 7개소에는 암반 관정이 설치되어 있으며, 마산만 유역에 해당하는 관측정 정보는 Table 6에 제시하였다. 한편, 1997년 및 1998년에 각 관측소에서 측정된 수위 자료와 마산, 진해만 권역 내 AWS(Automatic Weather Station, 자동기상관측소) 우량국에서 1시간 간격으로 관측된 강수량 자료를 이용하여 관측소별 지하수위 변동 특성을 분석하였다. Fig. 3, Fig 4는 각각 마산 진전과 진해 자은 지하수위 및 일강수량의 변화를 나타내며, 강우에 따른 지하수위 변동 특성을 요약하면 다음과 같다.

진해의 경우 암반과 충적층의 수위가 일정한 차이를 유지하며 거의 동일하게 변하고, 강우에 따른 수위 상승이 미약하게 나타나고 있다(간단한 수위변화 경향 추가).

관정에서의 수위 차는 암반 대수층의 피압 상태에 대한 간접적인 정보를 제공한다. 즉, 충적층 지하수의 수위가 암반 수위보다 높고 강우에 의한 수위 변동 특성이 유사한 경우 암반 대수층은 충적층으로부터 수직적인 지하수 유입이 발생하는 누수피압 대수층(leaky confined aquifer)

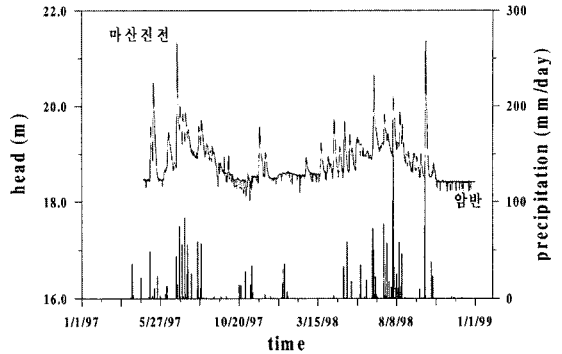


Fig. 3. Daily precipitation and groundwater level changes in Masan (Jinjeon).

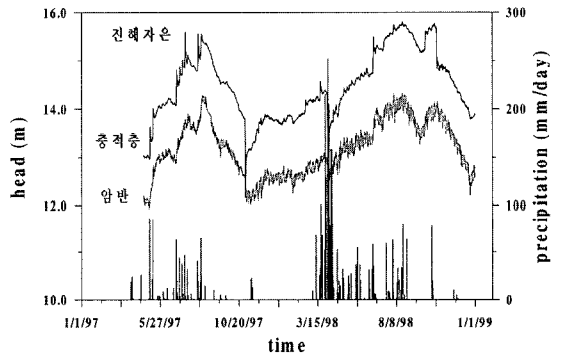


Fig. 4. Daily precipitation and groundwater level changes in Chinhae (Jaeun).

이며, 반대의 경우 지하수 함양 지역이 고지대에 위치하는 피압 대수층이다. 한편 암반과 충적층 지하수의 수위가 거의 일치하며 강우에 의한 수위 변동 특성도 유사한 경우 암반과 충적층은 수리적인 연결 상태가 매우 양호한 하나의 자유면 대수층이다. 하지만 이러한 대수층의 분류 방법은 암반 대수층에서의 지하수 채수로 인한 인위적인 수위 변동이 없는 것을 가정하므로, 양수에 의해 수위 변화가 발생한 경우 대수층의 피압 상태를 파악하기 위해서는 두 관정에서의 수위 변화 특성을 정밀하게 분석해야 한다. 예를 들어 울산광역시 상북 관측소의 경우 충적층 지하수위가 암반 수위보다 높으므로 위의 방법을

Table 6. Observation wells in Masan bay watershed

소유번호 (No. of Sub-basin)	고유번호 (ID Number)	주소 (Address)	용도 (Usage)	구경 (Diameter) (mm)
ST2	58	경상남도 마산시 합포구 자산동	학교용	200
ST2	59	경상남도 마산시 합포구 예곡동	일반용	250
ST2	170	경상남도 창원시 신천동	학교용	250
ST2	142	경상남도 진해시 여좌동	학교용	250

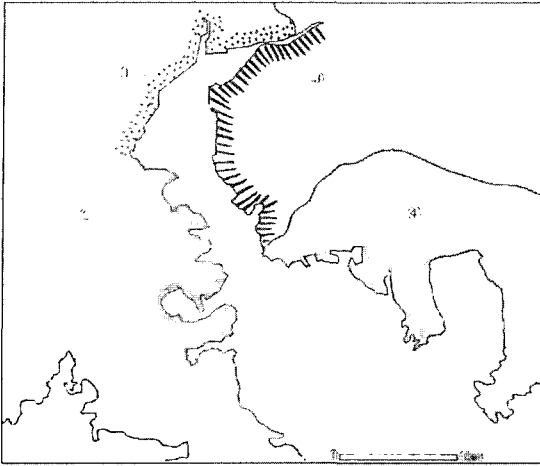


Fig. 5. Masan bay watersheds and observation well numbers.

적용하면 누수피압 대수층으로 분류된다. 하지만, 앞에서 언급한 바와 같이 양수의 영향으로 암반 지하수의 수위는 50 m 이상 떨어졌으나 충적층 지하수는 자연수위를 유지하므로 암반은 피압 대수층(confined aquifer)으로 분류되어야 한다.

낙동강권역에 위치하는 국가 지하수 관측망의 암반은 6개 관측소가 피압 대수층, 9개 관측소가 누수피압 대수층, 11개 관측소가 자유면 대수층으로 분류된다. 하지만 위의 분류 과정에서 일부 관측소는 누수피압 대수층과 자유수면 대수층(unconfined aquifer)의 구분이 명확하지 않아 장기간 관측에 의한 보완이 요구된다.

암반 대수층과 충적층 대수층의 흐름 특성은 서로 상

이하다. 특히 투수계수는 양수 시에 대수층 전체 두께에 대하여 산출되기 때문에 평균적으로 낮은 값을 가진다. 따라서 여기서는 암반대수층과 충적층 대수층의 유출량을 분리하여 산정하였다.

마산만의 해안선을 통하여 유출되는 지하수 유출량을 산정하기 위하여 마산만의 해안선을 4개의 소구역으로 분할하였다(Fig. 5참조). Table 7은 소유역의 관정 제원을 나타내고 있다. 암반층 투수량 계수는 국가 지하수 관측망 자료를 분석하여 도출하였고, 충적층 투수량 계수는 낙동강 광역 지하수조사연구 보고서를 참고하여 정리한 자료를 이용하여 도출하였다. 마산만 유역의 충적층은 창원 일부 지역을 제외하고는 발달되지 못하였고 전체적으로 투수가 양호하지 못하며, 대수층의 발달이 적어 투수량 계수는 Table 3의 최소값인 25.0 m²/day로 결정하였다.

Table 8은 마산만 소유역별 동수경사를 나타내고 있다. 본 연구에서 동수경사는 지하수위 표고와 해안수위(평균해수면)와의 차를 해안선까지의 거리로 나누어 준 값에 해당한다.

Table 8에서 1차 조사는 1999. 7.20~8.20, 2차 조사는 2000. 2.8~2.18, 3차 조사는 2000. 3.21~4.16, 4차 조사는 2000. 7.21~7.28에 측정된 것이다. 공변 ①, 공변 ④에서는 3차 조사의 지하수위가 2차 조사에 비해 높은 값을 보이는데, 이는 2000년 상반기의 가뭄과 영향이 있는 것으로 추정된다. 그리고 1차와 4차의 지하수위 차이는 1999년 하계의 강우량과 2000년 하계의 강우량 차이에 의한 영향보다는 관측공이 대부분 암반 관정이기 때문에 2000년 상반기의 가뭄으로 인해 지하수위가 매우 늦게 회

Table 7. Specification of the Masan observation wells

소유역 (Sub-basin)	일련번호 (Number)	행정구역 (Province)	고도 (Elevation) (m)	투수량계수 (Transmissivity) (m ² /day)	
				암반층	충적층
ST2	①	마산시 합포구 자산동	35.0	0.17	25.0
ST2	②	마산시 합포구 예곡동	45.0	0.17	25.0
ST2	③	창원시 신천동	18.8	0.02	25.0
ST2	④	진해시 여좌동	35.0	0.30	25.0

Table 8. Hydraulic gradient in Masan bay watersheds

공변 (Well No.)	해안선까지 거리 (distance)(km)	해안선길이 (length) (km)	지하수위(GWL)(m)				동수경사(Hydraulic gradient)			
			1차	2차	3차	4차	1차	2차	3차	4차
①	0.875	8.38	34.7	34.6	34.7	-	0.0397	0.0395	0.0397	-
②	2.125	22.50	37.0	37.5	36.5	36.3	0.0174	0.0176	0.0172	0.0173
③	1.125	10.03	14.2	4.4	0.1	10.2	0.0126	0.0039	0.0001	0.0091
④	1.625	13.88	31.1	28.8	31.5	32.4	0.0191	0.0177	0.0194	0.0199

Table 9. Groundwater discharges in Masan bay watershed

공번 (Well No.)	암반층 지하수 해안 유출량 (m ³ /year)				충적층 지하수 해안 유출량(m ³ /year)			
	1차	2차	3차	4차	1차	2차	3차	4차
①	20,621	20,561	20,621	-	3,032,483	3,023,743	3,032,483	-
②	24,309	24,638	23,981	24,178	3,574,853	3,623,162	3,526,544	3,555,529
③	921	286	6	662	1,151,778	356,889	8,111	827,333
④	29,088	26,937	29,462	30,304	2,423,982	2,244,716	2,455,158	2,525,306

복되기 때문에 판단된다(한국수자원공사, 2000). 낙동강 권역 광역 지하수조사 연구보고서에는 지하수위 자료가 충적층, 암반층 구분없이 제시(불분명한 기록)되어 있기 때문에, 충적층일 경우와 암반층일 경우로 가정하여 지하수 유출량을 산정하였다.

4.2 지하수 유출량 추정 결과 및 분석

Table 7, Table 8의 투수량계수([투수계수] · [지하수위]), 해안선 길이, 지하수위 및 동수경사 자료를 이용하여 마산만의 암반층 및 충적층 지하수 해안유출량을 추정하여 Table 9에 제시하였다. 지하수 유출량 추정을 위한 흐름 단면적(A)은 해안선 길이 · 지하수위(해수면으로부터의 고도, GWL)이다.

Table 10, Table 11에서 암반층 지하수로 인한 해안유출량/강수량의 비율이 평균 0.013%임해 반해 충적층 지하수로 인한 해안유출량/강수량의 비율은 평균 1.65%로서 약 130배 정도의 차이를 보이고 있다. 충적층을 통한 지하수 유출량은 시기적으로 큰 변화를 보이고 있지 않

으며, 1.0×10⁷ m³/year 정도로 추정되었다. 한편, 한국해양연구원(2003)에서는 마산만 유역의 지하수 유출량을 방사성 동위원소를 이용한 물질평형 방정식을 이용하여 추정한 바 있다. 재순환염수(re-circulated seawater)까지 포함하여 추정된 지하수 유출량은 하천 수량(하천 유출량)의 48% 정도에 도달하는 값으로 1.99×10⁸ m³/year이다. 이 값은 본 연구에서 추정된 값의 약 20배 이상에 해당하는 값이다. 일반적으로 지하수 유출량에 대한 하천 유출량의 비율은 시기 및 지역에 따라 큰 차이를 보이고 있으며, 수문학 전문가의 견해에 의하면 지하수 유출량은 하천 유출량의 5~10% 정도로 추정되고 있다. 따라서, 마산만 유역의 지하수 유출량은 재순환 염수에 의한 영향이 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 한국해양연구원(2002), 조홍연(2002)은 불수지 분석방법을 이용하여 1992년, 1993년 건기와 우기의 지하수 유출량을 월별로 추정하여 건기 · 우기의 지하수 유출양상을 비교하였다. 추정 결과, 건기에는 평균 2,500 m³/day 정도의 해수가 대수층을 통하여 해수가 유입되는 염수침입이 진행되고, 우기에

Table 10. Groundwater discharges in Masan bay watershed (Fractured-rock aquifer)

마산만 연평균강수량 (mm)	1,399			
마산만 유역면적(km ²)	410.7			
총 연강수량(m ³)	574,569,300			
	1차조사	2차조사	3차조사	4차조사
총 해안유출량(m ³ /day)	205.31	198.41	202.93	-
연간 총해안유출량(m ³ /year)	74,939	72,422	74,070	-
해안유출량/강수량	0.013%	0.013%	0.013%	-

Table 11. Groundwater discharge in Masan bay watershed (soil aquifer)

마산만 연평균강수량(mm)	1,399			
마산만 유역면적(km ²)	410.7			
총 연강수량(m ³)	574,569,300			
	1차조사	2차조사	3차조사	4차조사
총 해안유출량(m ³ /day)	205.31	198.41	202.93	-
연간 총해안유출량(m ³ /year)	10,103,096	9,248,510	9,022,296	-
해안유출량/강수량	1.77%	1.61%	1.57%	-

는 평균 5,000 m³/day 정도의 지하수가 연안해역으로 유출되는 양상을 보인다고 제시하였다. 즉, 물수지 분석방법으로 제시된 지하수 유출량을 연평균하면 약 1.0×10⁶ m³/year 정도이다. 물수지 분석방법은 본 연구에서 추정된 지하수 유출량에 비하면 약 10% 정도로 과약되고 있으나, 물수지 분석방법에 의한 지하수 유출량 추정이 1992년, 1993년에 추정량이기 때문에 직접적인 비교는 곤란하며, 방법은 간단하지만 강수량, 증발량 및 하천유출량에 비하여 상대적으로 작은 값이기 때문에 그 변화 폭이 크게 나타나는 영향으로 파악할 수 있다.

5. 결론 및 제언

마산만의 지하수에 의한 오염부하량 추정을 위하여 Darcy 방법을 이용하여 지하수 유출량을 추정하였다. 마산만 유역의 지하수위 측정을 통한 해안 지하수 유출량 산정과정에서 사용한 자료분석 및 지하수 유출량 추정절과는 다음과 같다.

- (1) 마산만 유역의 토양은 투수성이 양호하지 못하다.
- (2) 마산만의 암반층을 통한 해안지하수 유출은 총 강수량의 0.013%로 매우 미미한 정도로 추정되었다.
- (3) 마산만의 충적층을 통한 해안지하수 유출은 총 강수량의 1.65%로 타지역(울진지역 4.35%)에 비하여 유출 비율이 낮은 것으로 파악되었다.
- (4) 마산만 유역의 암반층을 통한 지하수 유출량은 0.7×10⁴ m³/year 정도로 추정되었으며, 충적층을 통한 지하수 유출량은 1.0×10⁷ m³/year 정도로 추정되어 암반층을 통한 유출량은 무시할 만한 정도로 파악되었다.

본 연구에서는 고려하지 않았지만 향후 연구과제로서 다음과 같은 점을 고려하여야 할 것이다. 연안유역의 지하수 유출량을 추정할 때 해안선 길이를 고려해야 하지만 실제 해안선 길이를 측정하여 계산에 사용한다면 과대추정(overestimation)할 수가 있다. 지하수 유출량 산정에 이용되는 해안선 길이는 영역별로 실제 해안선에 근사한 흐름방향에 직각인 방향의 곡선의 길이이다. 따라서, 흐름방향에 직각인 곡선(등지하수위선, iso-GWL)으로 가정하여 해안선에 근접한 곡선의 길이를 사용하여야 한다. 복잡한 실제 해안선의 만곡부 등을 측정된 값을 해안선 길이로 사용하면 계산에 이용되는 해안선의 길이가 증가하게 되고, 통수 단면적도 증가하게 되어 지하수 유출량이 과대 추정된다. 그러나, 이는 등지하수위선(iso-GWL)을 측정하여 등고선을 따라서 유출 면적을 산출함으로써 보

정할 수가 있다. 실제로는 등지하수위 선을 구하기 위해서는 여러 개의 관측정이 필요하므로 과다한 비용이 드는 단점이 있다. 또한 전기탐사 등을 통한 지반조사를 통하여 연안유역의 충적층과 대수층에 대한 자세한 정보를 얻는 것이 기저유출로 연안으로 빠져나가는 유량을 비교적 정확하게 산정하는데 도움을 줄 것이다.

지하수와 해수와 만나는 해안선에서의 관측을 보완하여 지하수와 혼합되어 재순환되는 해수유출량을 추정하여 지하수 유출과 재순환해수에 의한 영향을 정량적으로 파악하는 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구성과는 2003년도 원광대학교 교비지원을 받아 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 과학기술처 (2002). 수자원의 지속적 확보기술 개발사업 3-3과제 중 해안지하수 유출량 산정 연구.
- 국가지하수정보센터 (2004). <http://www.gims.go.kr/>.
- 기상청 (2004). <http://www.kma.go.kr/>.
- 김규한 (1982). 동위원소의 지하수학에 응용, 지질학회지, 18(3), 167-171.
- 박남식, 이용두 (1997). 중·동 제주수역의 지하수 개발로 인한 해수침투. 대한지하수환경학회, 4(1), 5-13.
- 부성안, 정교철 (2000). 제주도 동부권역 담지하수 대수층에서의 염수침입. 대한지질공학회지, 10(2), 115-130.
- 선우중호 (1983). 수문학. 동명사.
- 조홍연 (2002). 연안유역의 지표수 및 지하수량 산정방법. 한국해양환경공학회 2002 춘계학술대회 논문집, 제주대학교, 297-306.
- 한국수자원공사 (1999). 울진지역 지하수 기초조사 보고서.
- 한국수자원공사 (2000). 낙동강권역 광역 지하수조사 연구.
- 한국해양연구원 (2000). 연안역에서의 육지와 해양상호작용 연구. 남해동부연안역의 영양물질 유입과 생물생산력 개발 환경조성 기반기술, BSPE-784-00-1294-4.
- 한국해양연구원 (2002). 연안역에서의 육지와 해양상호작용 연구. 남해동부연안역의 영양물질 유입과 생물생산력 개발 환경조성 기반기술, BSPE-819-00-1392-4.
- 한국해양연구원 (2003). 연안역에서의 육지와 해양상호작용 연구. 남해동부연안역의 영양물질 유입과 생물생산력 개발 환경조성 기반기술, BSPE-827-01-1493-4.
- Basu, A.R., Jacobsen, S.B., Poreda, R.J., Dowling, C.B. and

- Aggarwal, P.K. (2001). Large groundwater strontium flux to the oceans from the Bengal basin and the marine strontium isotope record. *Science*, 293, 1470-1473.
- Brenner, M., Smoak, J.M., Allen, M.S., Schelske, C.L. and Leeper, D.A. (2000). Biological accumulation of ^{226}Ra in a groundwater-augmented Florida lake. *Limnology and Oceanography*, Notes, 45(3), 710-715.
- Fetter, C. W. (1994). *Applied hydrogeology*. 3rd Edition, Prentice Hall.
- Kelly, R.P. and Moran, S.B. (2002). Seasonal changes in groundwater input to a well-mixed estuary estimated using radium isotopes and implications for coastal nutrient budgets. *Limnology and Oceanography*, 47(6), 1796-1807.
- Krest, J.M. and Harvey, J.W. (2003). Using natural distributions of short-lived radium isotopes to quantify groundwater discharge and recharge. *Limnology and Oceanography*, 48(1), 290-298.
- Moore, W.S. and Arnold, R. (1996). Measurement of ^{223}Ra and ^{224}Ra in coastal waters using a delayed coincidence counter. *J. of Geophysical Research*, 101(C1), 1321-1329.
- Smith, L. and Wheatcraft, S.W. (1993). Groundwater flow. *Handbook of Hydrology* (Editor in Chief, D.R. Maidment), McGraw-Hill.
- World Meteorological Organization (1994). *Guide to hydrological practices. Data Acquisition and Processing, Analysis, Forecasting and Other Applications*, Fifth edition, WMO-No. 168.

Received September 30, 2004

Accepted November 27, 2004