

## <Technical Report>

# 해수침투 발생 시 혼합비 계산의 오차에 관한 연구

이정훈<sup>‡</sup>

이화여자대학교 과학교육과

### 요 약

해수침투가 발생할 때 혼합비를 결정하는 것은 해수침투연구에 매우 중요한 사항이며, 단성분 혼합분석방법을 주로 사용한다. 본 연구에서는 이러한 해수와 담수의 혼합비 계산시 발생하는 오차를 불확정성의 원리를 이용하여 결정하였다. 또한 해수침투 혼합비를 계산할 때 평균값과 표준편차의 차이에 의해 발생할 수 있는 혼합비의 오차를 제시하였다. 이러한 오차의 크기는 (1) 혼합비가 커질수록, (2) 사용된 평균값과 표준편차값의 차이가 클수록, 마지막으로 (3) 해수와 배경지하수의 추적자 농도 값이 작을수록 커진다. 특히, 해수침투가 발생하여 양이온교환반응이 일어날 때 이온델타(이론적인 지하수화학적분과 실제 시료의 화학성분의 차이)값이 0 근처에서는 오차값이 지구화학적인 상태(침전 또는 용해)를 결정하는 데에 기여할 수 있다.

**주요어:** 해수침투, 혼합비, 불확정 원리, 양이온교환

**Jeonghoon Lee, 2018, A study on propagation of uncertainties for a mixing ratio calculation by seawater intrusion. Journal of the Geological Society of Korea. v. 54, no. 5, p. 579-584**

**ABSTRACT:** It is crucial to determine a mixing ratio using an end-member mixing analysis when there is seawater intrusion. In this study, an error from the calculation of the mixing ratio between seawater and freshwater based on the principles of uncertainty was determined. I present the errors in the calculated mixing ratios as a function of the chemical difference between the mean seawater concentrations and standard deviations. The error is caused by: (1) the mixing ratio between seawater and freshwater; (2) the difference between the mean concentration and the standard deviation; and (3) the difference of the tracer concentration between freshwater and seawater (inversely). In particular, the error may determine hydrogeochemical process (either precipitation or dissolution) when a value of ionic delta (difference between measured and theoretical concentration) is close to zero during cation exchange by seawater intrusion.

**Key words:** seawater intrusion, uncertainty, mixing ratio, cation exchange

(Jeonghoon Lee, Dept. of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 03760, Republic of Korea)

## 1. 서 론

국내에서는 지난 20여 년간 해수침투(seawater intrusion)와 관련하여 다양한 시도를 통한 연구가 진행되어 왔다(Han *et al.*, 2015; Shin *et al.*, 2017). 해수침투는 해안지역에서 가장 넓게 일어나는 지하수의 오염으로 자연적인 요인으로는 조석과 강우량이 있으며, 인위적인 요인으로는 과도한 지하수의 사용 등이 있다(Park *et al.*, 2005). 실제 해수침투와 관련된 국내 다수의 연구는 서해안과 남해안에 집중

되어 있으며, Jeon *et al.* (2001)은 화성 지역의 천부 지하수에서의 해수 영향을 확인하였다. Park *et al.* (2012)은 국내 전 지역을 대상으로 해수에 의해 지하수가 영향을 받을 때의 지구화학적 변화를 제시하였다. 염소와 브롬화이온을 이용하여 연구지역 시료 중에서 41%가 해수에 의해 영향을 받았음을 보였다. Kim *et al.* (2003)은 산소동위원소, 염소와 브롬 이온화를 이용하여 제주지역 내륙 2.5 km까지 해수 침투가 일어나고 있음을 제시하였으며, 제주지역의 지질학적인 특성으로 인해 해수와 담수의 경계면이

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-2-3277-3794, E-mail: [jeonghoon.d.lee@gmail.com](mailto:jeonghoon.d.lee@gmail.com)

일정하지 않을 것으로 추론하였다.

자연적 또는 인위적인 요인에 의해 해수와 담수가 섞이는 과정인 해수침투는 해안지역에서 이용할 수 있는 지하수의 양을 감소시키는 역할을 한다. 추적자를 이용하여 지하수와 해수가 얼마만큼 혼합이 되었는가를 이해하는 것은 매우 중요하며, 이러한 혼합계산 시 추적자의 농도를 바탕으로 하기 때문에 불확정을 제시하는 것도 매우 중요하다. 해수침투가 발생할 때 해수와 지하수의 혼합비(mixing ratio)는 비반응추적자(conservative tracer)의 질량보존(mass conservation)방정식을 정립하여 혼합비를 계산한다. 주로 사용되는 추적자에는 염소이온(Cl<sup>-</sup>), 브롬화이온(Br<sup>-</sup>), 물의 두 안정동위원소인 산소와 수소동위원소( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ )가 주로 사용된다. 연구지역의 지하수 중에서 배경농도에 해당되는 시료와 연구 지역 주변 해수시료의 추적자 농도를 분석하고 질량보존 방정식을 이용한다. 해수침투가 얼마만큼 일어났는가에 대한 해수의 경우에는 분석의 어려움과 이전 연구에서 분석값이 많이 발표되어 있는 이유로 인해 문헌값을 이용하거나 주변 해안에서 해수 시료를 채취하고 평균값을 주로 이용한다. 이러한 값을 이용하여 지하수와 해수의 혼합비(mixing ratio)를 계산하게 되면, 오차(uncertainty)가 발생하게 된다. 이는 단성분 화학조성값이 지역 또는 시간에 따라 다르기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 오차를 불확정성의 원리를 이용하여 계산하고 어떠한 요인에 의해서 오차가 증가 또는 감소하는가를 논의하였다. 다음 장에서는 단성분 혼합분석에서 발생하는 오차에 대한 수학적 미분방정식을 고찰해 보았으며, 3장에서는 2장에서 제시한 수학적 식으로부터 계산된 결과를 통해 해수침투 시 계산된 혼합비의 오차결과를 제시하였다.

## 2. 단성분 혼합분석(End Member Mixing Analysis, EMMA)

지하수의 혼합(mixing) 과정을 이해하는 데 가장 많이 사용되는 방법이 추적자(tracer)의 농도 또는 동위원소 조성을 이용한 단성분 혼합분석(EMMA)이다(Kim *et al.*, 2017). EMMA를 수행하기 위해서는 추적자로 사용되는 단성분 사이의 화학조성 또는 동위원소 비율의 차이가 커야 하며, 추적자는 지질

매체와의 반응으로 인해 농도 및 동위원소 비율이 변하지 않아야 한다. 해수와 담수의 혼합비(mixing ratio)를 구하기 위해서 연구지역 지하수의 배경농도(background concentration of groundwater)와 해수의 화학조성을 각 단성분(end member)으로 가정할 수 있다(Kim *et al.*, 2017). 추적자로는 주로 비반응추적자(conservative tracer)인 염소이온, 브롬화이온 및 물의 두 안정동위원소를 이용하며 질량보존의 법칙을 이용한 다음의 식 (1)으로 시료의 혼합비를 나타낼 수 있다(Lee *et al.*, 2014).

$$C_{a,gr} = xC_{sea} + (1-x)C_{p,gr} \quad (1)$$

여기서,  $x$ 는 해수와 담수의 혼합비를 나타내며,  $C_{a,gr}$ 는 해수의 영향을 받은 지하수의 추적자농도이며,  $C_{sea}$ 와  $C_{p,gr}$ 는 해수의 추적자농도 및 연구지역 지하수의 추적자 배경농도에 해당된다. 혼합비를 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$x = \frac{C_{a,gr} - C_{p,gr}}{C_{sea} - C_{p,gr}} \quad (2)$$

해수와 담수의 혼합비( $x$ )는 식(2)를 사용하여 정량적으로 계산할 수 있으며,  $x$ 의 표준오차(standard error)는 가우스의 불확정성전파(Gaussian error propagation)를 이용하여 상대오차를 구할 수 있으며, 다음과 같이 정리될 수 있다(Genereux, 1998).

$$s_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial C_{a,gr}}\right)^2 s_{C_{a,gr}}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial C_{p,gr}}\right)^2 s_{C_{p,gr}}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial C_{sea}}\right)^2 s_{C_{sea}}^2} \quad (3)$$

여기서,  $s_x$ 는  $x$ 의 표준오차를 나타내며,  $s_{C_{a,gr}}$ ,  $s_{C_{p,gr}}$ ,  $s_{C_{sea}}$ 는 각각 해수의 영향을 받은 지하수, 배경지하수, 해수 추적자 농도의 상대오차를 나타낸다.

식 (3)에서 해수와 지하수의 혼합비율( $x$ )의 상대오차를 계산할 때, 세 가지의 제공항이 존재한다. 여기서, 첫 번째 제공항에서 해수의 영향을 받은 지하수 자체의 농도변화에 의해 발생하는  $x$ 의 표준오차를 수학적으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial C_{a,gr}} \Delta C_{a,gr} = \frac{1}{(C_{sea} - C_{p,gr})} \Delta C_{a,gr} \quad (4)$$

**Table 1.** Chloride concentrations of seawater for mixing ratio calculations from previous studies.

Reference	Location	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Br <sup>-</sup> (mg/L)
Faye <i>et al.</i> (2005)	Saloum , Senegal	19888.67 ±2423.38	67.00
Park <i>et al.</i> (2005)	Western Coastal Area, South Korea	19350.00	NA*
Pulido-Leboeuf (2004)	Castell de Ferro, Spain	21259.00	132.00
Argamasilla <i>et al.</i> (2017)	Marbella – Estepona, Spain	19472.00	66.00
Han <i>et al.</i> (2015)	Daweijia, China	16211.50 ±668.08	NA
Na and Son (2005)	Seomjin River, South Korea	18800.00	67.00
Capaccioni <i>et al.</i> (2005)	Sicily, Italy	21204.50 ±34.65	NA
Kim <i>et al.</i> (2006)	Yeonggwang, South Korea	14408.02	67.00
Kim <i>et al.</i> (2003)	Jeju, South Korea	18211.00	64.70
Lee and Song (2007)	Buan, South Korea	16716.00	NA
Jeen <i>et al.</i> (2001)	Mid-western Coast, South Korea	19300.00	73.00
Shin <i>et al.</i> (2002)	Gogum, South Korea	17164.00	NA
Kim <i>et al.</i> (1997)	Yeosu, South Korea	14230.50 ±528.21	NA

NA\*: Not Analyzed

여기서  $\Delta x$ 는  $x$ 의 계산된 오차이다. 배경지하수의 농도변화에 의해 발생하는 상대오차, 즉 식 (3)에서 두 번째 제곱항에 해당되는 것을 수학적으로 표시하면 식 (5)와 같다.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial C_{p,gr}} \Delta C_{p,gr} = \frac{(C_{a,gr} - C_{p,gr}) - (C_{sea} - C_{p,gr})}{(C_{sea} - C_{p,gr})^2} \Delta C_{p,gr} = \frac{x-1}{(C_{sea} - C_{p,gr})} \Delta C_{p,gr} \quad (5)$$

해수의 영향을 받은 지하수의 시료의 농도에 분석오차가 없다면  $\Delta C_{a,gr}$ 은 0에 수렴하므로 식 (4)에 의한 오차는 없다고 할 수 있다. 또한, 배경지하수의 농도 역시 분석오차가 없다면  $\Delta C_{p,gr}$ 은 0에 수렴하므로 식 (5)에 의한 오차 역시 없다고 할 수 있다. 마지막으로, 해수의 농도변화에 의해서 발생하는 상대 오차, 즉 식 (3)에서 세 번째 제곱항에 해당되는 것을 다음과 같이 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta x = \frac{\partial x}{\partial C_{sea}} \Delta C_{sea} = -\frac{(C_{a,gr} - C_{p,gr})}{(C_{sea} - C_{p,gr})^2} \Delta C_{sea} = -\frac{x}{(C_{sea} - C_{p,gr})} \Delta C_{sea} \quad (6)$$

$\Delta C_{sea}$ 는  $C_{sea}$ 의 오차이며, 이는 해수의 추적자농도로 사용되는 값과 지역에 따른 해수의 추적자농도

값의 차이이다. 예를 들어, 지역에 따른 해수 추적자의 농도값을 고려하지 않고 평균값을 사용할 때 발생할 수 있는 차이이다. 또는, 해수 시료 여러 개를 채취하고 분석한 평균과 표준편차 간의 차이도 될 수 있다. 따라서, 식 (6)에 의하면 해수와 지하수의 혼합비( $x$ )를 고려하였을 때 발생하는 오차는 해수와 배경지하수의 농도차에 반비례하며 혼합비 자체와 해수 추적자농도의 차이에 비례한다.

세 가지의 제곱항에서 처음 두 항은 0에 수렴하였으며, 마지막항의 해수농도의 표준편차에 의한 상대 오차항만이 존재함을 알 수 있다. 따라서, 다음 장에서는 해수 추적자의 농도의 편차에 의한 상대오차를 계산하기 위해 실제 연구에서 사용된 해수의 농도를 표 1에 제시하였다. 표 1에 제시된 해수의 Cl<sup>-</sup>와 Br<sup>-</sup>농도의 평균 및 표준편차는 각각 18,170±2,293 mg/L, 76.7±24 mg/L이었다.

### 3. 연구 결과 및 토의

앞 장에서 해수의 추적자 농도의 차이에 의해 해수침투시 지하수와 해수 혼합비( $x$ )의 상대오차가 결정됨을 보였다. 식 (2)에서 해수의 추적자 농도에 변

화가 발생하면  $x$ 의 오차가 발생함을 알 수 있다. 식 (2)에서 사용된 해수의 추적자 농도 평균값에 비해 실제 해수의 추적자 농도가 낮다면  $x$ 값을 과대평가 (overestimate) 할 수 있으며, 높다면  $x$ 값을 과소평가 (underestimate) 할 수 있다(식 (6)).  $x$ 의 오차는  $x$  값 자체, 해수추적자의 농도변화에 비례하여, 해수 추적자와 배경지하수 추적자 간의 농도차에 반비례함을 알 수 있다. 표 1의 평균값과 표준편차를 이용하여 그림 1은 Cl, 그림 2는 Br의 오차값을 나타내었다. 그림 1은 식 (6)에 의한  $x$ 의 상대오차를 언급

한 세 가지의 함수로 나타낸 것이다.

그림 1에서 수직축( $C_{sea}-C_{p.gr}$ )의 0을 기준으로 위 부분은  $x$ 값을 과소평가 한 영역이며, 아랫부분은  $x$ 값을 과대평가 한 부분이다.  $\Delta C_{sea}$ 를 표준편차값으로 가정한다면, 그림 1과 같은 오차값의 분포를 얻을 수 있다. 예를 들어, 여러 지역에서 채취한 해수의 평균값이 18,170 mg/L이며 표준편차가  $\pm 2,293$  mg/L라고 가정하여 EMMA를 이용하여 해수침투가 일어날 때의 혼합비를 계산한다고 가정해 볼 수 있다 (Shin *et al.*, 2017). 이 때, 혼합비가 10%이며, 배경지

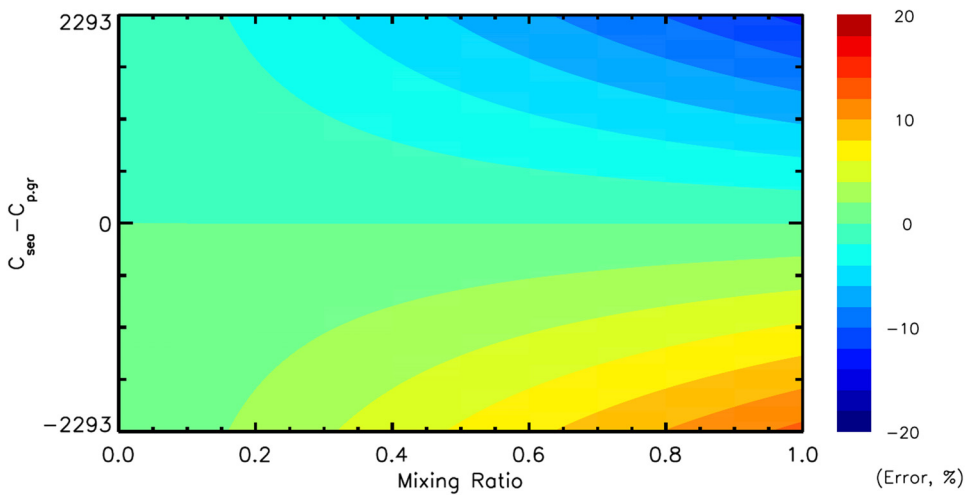


Fig. 1. Contour diagram of the error in the calculated mixing ratio as a function of the chemical difference between the averaged seawater concentration and standard deviation ( $1\sigma$ ) using chloride ion in Table 1.

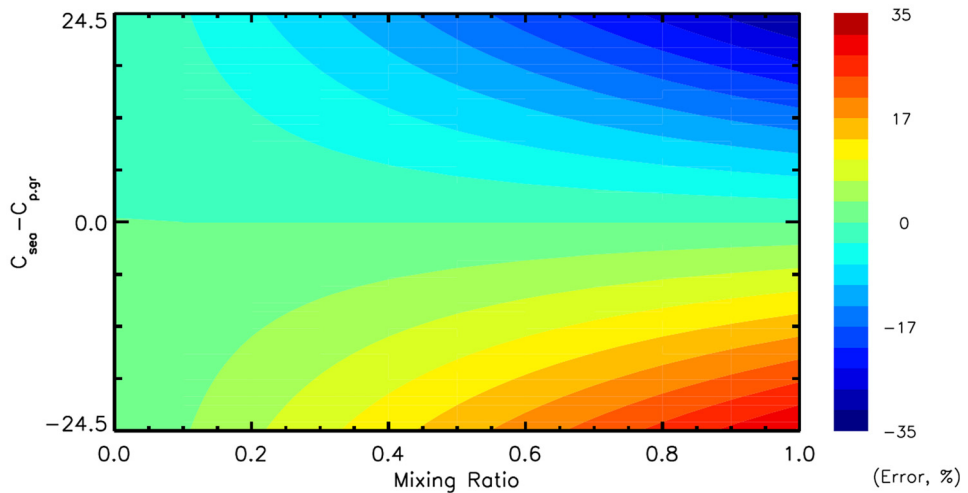
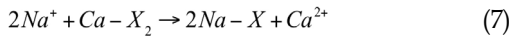


Fig. 2. Contour diagram of the error in the calculated mixing ratio as a function of the chemical difference between the averaged seawater concentration and standard deviation ( $1\sigma$ ) using bromide ion in Table 1.

해수의 염소이온농도가 거의 0이라고 한다면, 오차 값은  $\pm 0.012$  ( $\pm 1.2\%$ )만큼 발생하게 된다. 다시 말해, 평균값이 18170mg/L인 해수 농도를 가지는 지역에서  $+1\sigma$ 의 차이가 있는 시료(20,463 mg/L=18,170 mg/L +2,293 mg/L)는  $-1.2\%$ 만큼의 오차를 발생시킨다.

그림 2는 Br<sup>-</sup>이온을 추적자로 사용하고 표 1의 값을 이용하여 오차를 나타낸 것이다. 염소이온과 브롬이온 모두 문헌에 제시된 값들의 평균과 표준편차를 이용하였지만 브롬이온의 경우가 표준편차/평균의 비율이 높아(염소이온과 브롬이온 각각 12.6%, 32.0%), 염소이온과 같이 평균(76.7 mg/L)과 표준편차( $\pm 24$  mg/L)를 적용하게 되면, 오차값이  $\pm 0.032$  ( $\pm 3.2\%$ )만큼 발생하게 된다(10% 혼합비 가정). 즉, 평균값과 적용하는 값의 차이가 클수록 오차의 절대 값은 커지게 된다.

해수침투가 발생하면 해수와 혼합된 지하수와 지질매체간의 다양한 지구화학적 반응이 일어난다(Liu *et al.*, 2017). 그 중에서 가장 대표적인 것이 양이온교환반응(cation exchange)인데, Na<sup>+</sup>가 Ca<sup>2+</sup>로 교환되는 반응은 다음과 같이 표현될 수 있다.



여기에서, X는 이온교환반응이 일어날 수 있는 지질매체를 나타낸다. 혼합비가 결정되면, 혼합된 지하수의 이론적인 화학조성이 결정될 수 있으며 실제 시료가 가지는 값과의 차이(이온델타)를 구할 수 있다 ( $\Delta Na^+$ ,  $\Delta Ca^{2+}$ ,  $\Delta Mg^{2+}$  등). 예를 들어, 시료의  $\Delta Ca^{2+}$  값과  $\Delta Na^+$  값이 모두 양의 값을 가지게 되면 이는 시료에 이론적인 값 이상이 들어 있는 것을 의미하므로 암석에서의 용해(dissolution)을 의미하게 된다. 반대로, 두 값 모두 음의 값을 가지게 되면 이는 이론적인 값 이하로 들어 있는 것을 의미하므로 침전(precipitation)을 뜻하게 된다. 따라서, 혼합비가 해수침투가 일어날 때 지구화학적변화를 이해하는 데에 중요한 역할을 하며, 특히 값이 0 근처에서 오차에 의해 용해와 침전이 결정될 수 있다.

#### 4. 결론

해수침투가 일어나는 해안지역에서 해수가 얼마

만큼 담수와 혼합하였는가를 결정하는 것은 매우 중요한 일이다. 이번 연구를 통하여 해수침투가 발생하는 지역에서 해수와 담수의 혼합비를 계산할 때 오차가 발생할 수 있음을 보였다. 이러한 오차로 인하여 해수와 담수가 혼합될 때 사용된 값이 평균값보다 낮을 때는 혼합비를 과대평가 할 수 있으며, 높을 때는 과소평가 할 수 있다. 혼합비 계산과정에서 오차의 크기는 혼합비가 커질수록, 사용된 값과 평균값의 차이가 클수록, 마지막으로 해수추적자와 배경농도간의 차이가 작을수록 커진다. 따라서, 해수와 담수의 혼합비율을 결정할 때 단성분의 시료를 정확하게 채취하고 분석해야 이러한 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 극지연구소 “장보고기지 주변 빙하 하부 수문계측망 특성 규명(20140410)”과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- Argamasilla, M., Baberá, J.A. and Andreo, B., 2017, Factors controlling groundwater salinization and hydrogeochemical processes in coastal aquifers from southern Spain. *Science of the Total Environment*, 580, 50-68.
- Capaccioni, B., Didero, M., Paletta, C. and Didero, L., 2005, Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwaters. *Journal of Hydrology*, 307, 1-16.
- Faye, S., Maloszewski, P., Stichler, W., Trimborn, P., Faye, S.C. and Gaye, C.B., 2005, Groundwater salinization in the Saloum (Senegal) delta aquifer: minor elements and isotopic indicators. *Science of the Total Environment*, 343, 243-259.
- Genereux, D., 1998, Quantifying uncertainty in tracer-based hydrograph separation. *Water Resources Research*, 34, 915-919.
- Han, D., Post, V.E.A. and Song, X., 2015, Groundwater salinization processes and reversibility of seawater intrusion in coastal carbonate aquifers. *Journal of Hydrology*, 531, 1067-1080.
- Jeen, S.-W., Kim, J.-M., Ko, K.-S., Yum, B. and Chang,

- H.-W., 2001, Hydrogeochemical characteristics of groundwater in a mid-western coastal aquifer system, Korea. *Geosciences Journal*, 5, 339-348.
- Kim, C.-S., Kim, K.-S., Bae, D.-S. and Song, S.-H., 1997, Hydrogeological Characteristics of Seawater Intrusion in the Coastal Area. *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 4, 61-72 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Cho, S.-H., Lee, D., Jung, Y.-Y., Kim, Y.-H., Koh, D.-C. and Lee, J., 2017, Influence of pre-event water on streamflow in a granitic watershed using hydrograph separation. *Environmental Earth Sciences*, 76-82 (in Korean with English abstract), DOI 10.1007/s12665-017-6402-6.
- Kim, R.-H., Kim, J.-H., Ryu, J.-S. and Chang, H.-W., 2006, Salinization properties of a shallow groundwater in a coastal reclaimed area, Yeonggwang, Korea. *Environmental Geology*, 49, 1180-1194, doi:10.1007/s00254-005-0163-3.
- Kim, Y., Lee, K.-S., Koh, D.-C., Lee, D.-H., Lee, S.-G., Park, W.-B., Koh, G.-W. and Woo, N.-C., 2003, Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer: a case study in Jeju volcanic island, Korea. *Journal of Hydrology*, 270, 282-294.
- Lee, J., Koh, D.C. and Choo, M.K., 2014, Influences of fractionation of stable isotopic composition of rain and snowmelt on isotopic hydrograph separation. *Journal of Korean Earth Science Society*, 35, 97-103 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-Y. and Song, S.-H., 2007, Groundwater chemistry and ionic ratios in a western coastal aquifer of Buan, Korea: implication for seawater intrusion. *Geosciences Journal*, 11, 259-270.
- Liu, Y., Jiao, J.J., Liang, W. and Kuang, X., 2017, Hydrogeochemical characteristics in coastal groundwater mixing zone. *Applied Geochemistry*, 85, 49-60.
- Na, C.-K. and Son, C.-I., 2005, Groundwater Quality and Pollution Characteristics at Seomjin River Basin: Pollution Source and Risk Assessment. *Economic and Environmental Geology*, 38, 261-272 (in Korean with English abstract).
- Park, S.-C., Yun, S.-T., Chae, G.-T., Yoo, I.-S., Shin, K.-S., Heo, C.-H. and Lee, S.-K., 2005, Regional hydrochemical study on salinization of coastal aquifers, western coastal area of South Korea. *Journal of Hydrology*, 313, 182-194.
- Pulido-Leboeuf, P., 2004, Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain). *Applied Geochemistry*, 19, 1517-1527.
- Shin, I.-H., Park, C.-Y., Ahan, K.-S. and Jeong, Y.-J., 2002, Hydrogeochemistry of Groundwaters at the Gogum island area in Jeonnam, Korea. *Journal of Earth Science Society of Korea*, 23, 474-485 (in Korean with English abstract).
- Shin, K., Koh, D.-C. and Lee, J., 2017, An analysis of seawater effect on groundwater quality, in the region of Sinan-gun, Jeonnam, Korea. *Journal of Earth Science Society of Korea*, 38, 570-580 (in Korean with English abstract).

---

Received : August 27, 2018

Revised : September 17, 2018

Accepted : September 19, 2018