

## 부산지역 지열수의 기원과 진화: I. 가열된 해수-암석 반응과 지하수의 혼입에 따른 희석과 냉각

성규열<sup>1\*</sup> · 박맹언<sup>1</sup> · 고용권<sup>2</sup> · 김천수<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 환경지질학과, <sup>2</sup>한국원자력연구소

## Evolution and Origin of the Geothermal Waters in the Busan Area, Korea: I. Cooling and Dilution by Groundwater Mixing after Heated Seawater-Rock Interaction

Kyu-Youl Sung<sup>1\*</sup>, Maeng-Eon Park<sup>1</sup>, Yong Kwon Koh<sup>2</sup> and Chun Soo Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. Environ. Geosci., Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

<sup>2</sup>Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600, Korea

The geothermal waters from the Busan area belong to Na-Cl type and are characterized by much higher EC (921~6,520  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) and TDS (608~3,390 mg/L) than other geothermal waters in Korea. The concentration of major ions shows a weakly positive relationship with temperature except for Mg ion. The concentrations of the major cations have the order of Na>Ca>K>Mg. Ca ion is enriched and Mg ion is depleted compared with seawater. All Br concentrations of geothermal water are lower than those of seawater, showing a positive relationship with temperature. Generally geochemical characteristics of geothermal waters of the Busan area indicate that these waters have relatively increased Ca and Sr contents and depleted Mg, Na and K contents caused by seawater interaction with wall rock at depth during deep circulation of seawater. Base on the relationship between major ions and temperature, saline geothermal waters are diluted and are cooled by mixing of groundwaters during ascent. Isotope study and reaction path modeling of the overall geochemical system are required in order to better quantify the evolution and origin of geothermal waters in the Busan area.

**Key words:** geothermal waters of the Busan, seawater-rock interaction, groundwater mixing, cooling and dilution, reaction path modeling.

부산지역의 지열수는 Na-Cl형으로서 한국의 타지역에서 산출되는 지열수에 비해 전기전도도(921~6,520  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )와 총용존고체함량(608~3,390 mg/L)이 비교적 높다. 부산지역 지열수는 Mg를 제외한 주요 이온들이 온도가 증가함에 따라 농도가 대체로 증가하는 약한 정의 상관관계를 나타낸다. 주요 양이온의 함량은 Na>Ca>K>Mg의 순으로 나타나며, 해수에 비해 Ca가 부화되어 있고, Mg가 결핍되어 있다. 이 지열수의 Br 함량은 모두 해수보다 낮으며, 온도가 증가함에 따라 증가하는 정의 상관관계를 보인다. 이를 종합하면, 부산지역 지열수는 심부로 순환하는 해수가 주변 모암과의 상호반응에 의해 해수에 비해 상대적으로 증가된 Ca와 Sr의 함량과 상대적으로 결핍된 Mg, Na와 K의 함량을 갖는 지열수를 형성한 것으로 여겨진다. 또한 주요 이온들과 온도와의 상관관계로 볼 때, 높은 염도의 지열수가 상승하는 동안 저온의 주변 지하수와 혼합되어 냉각과 함께 희석작용이 있었던 것으로 보인다. 이 지열수의 기원과 진화를 정확히 규명하기 위해서는 안정동위원소 연구와 함께 전체 지구화학계에 대한 물-암석 반응 모델링이 수행되어야 할 것이다.

**주요어 :** 부산지역 지열수, 해수-암석반응, 지하수혼입, 냉각과 희석, 반응경로모델링

\*Corresponding author: sungky@mail1.pknu.ac.kr

## 1. 서 언

지열수는 지구 내부에 기원을 둔 지열에 의해 형성된 물을 의미한다. 화석연료 사용에 따른 환경문제가 대두됨에 따라 선진국에서는 대체 에너지의 일환으로 지열 에너지에 대한 탐사 및 개발이 활발하게 진행되고 있다 (Huttrer, 2001). 국내에서도 지열 에너지 자원의 개발과 관련하여 탐사가 진행된 바 있으나(Han, 1979), 대체 에너지로 이용될 수 있는 고온의 지열대는 발견되지 않고 있는 실정이다. 최근 국내 지열수의 보존과 오염문제가 대두됨에 따라 이에 대한 보존조사가 활발히 이루어지고 있으나, 실제조사는 수온, 수량 및 수질에 대한 단편적인 특성에만 국한되어 왔다(이동영과 임정웅, 1995; 염병우와 김용제, 1999). 그러나, 지열수 자원의 효율적인 활용과 보존을 위해서는 지열수를 보존하고 있는 심부환경에 대한 연구가 선행되어야 한다. 최근 일부 연구자들에 의해 몇몇 지열수의 생성과정과 물-암석 반응 관계에 대한 연구가 진행된 바 있으나(Yun *et al.*, 1998a; 1998b; 김진영 등, 2000; 고용권 등, 2001), 아직은 초기 단계에 머물고 있으며 국내 지열수를 배태하고 있는 심부환경에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

부산지역 지열수는 특징적으로 Na와 Cl의 함량이 높아 식염천으로 분류되며, 다른 지역에서 산출되는 지열수에 비해 전기전도도와 총용존고체함량이 비교적 높다. 이는 지리적으로 해안에 위치하고 있어 해수의 직·간접적인 영향을 받을 수 있는 환경에 놓여 있기 때문이다. 金奎漢과 中井信之(1981)는 황 안정동위원소 연구를 통하여 해운대 지열수의  $\delta^{34}\text{S}$  값은 +20‰로서 동해의  $\text{SO}_4$ 가 혼합된 것으로, 동래 지열수의  $\delta^{34}\text{S}$  값은 +10~17‰로서 황화광물과 해수의 혼합형으로 해석하였으며, 김규한과 최현정(1998)은 해운대와 동래 지열수의 높은 Na 함량은 온천수에 해수기원의 Na가 혼합된 결과로 해석하였다. Han *et al.*(1999), 심형수 등(2000)과 함세영 등(2000)은 Cl와 주요 이온들간의 상관관계 분석 및 요인분석을 통하여 Na, Cl,  $\text{SO}_4$  등이 해수회석선에 가깝게 위치하고, 이들 이온들간에 높은 상관성 있어 염수(동래 지열수는 해수기원의 염수로 해석)의 영향을 받고 있는 것으로 판단하였으나, 그 기원과 진화에 대한 구체적인 자료가 제시되지는 않았다.

따라서 이 연구에서는 해운대와 동래 지열수에 대하여 물리·화학적 자료를 체계적으로 해석함으로써 지구화학적 특성과 용존 이온의 분포 및 거동 특성을 규명하였다. 이들 자료를 근거로 물-암석 반응 및 지열수의 지구화학적 진화과정과 지열수를 배태하고 있는 심

부 지구화학적 환경에 대한 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 지질환경

부산은 지리적으로 한반도 동남부의 최남단으로서 남해와 동해의 경계부에 위치하고 있다. 부산지역은 중생대 백악기 말에 형성된 퇴적암류를 기반암으로 하여, 이를 부정합으로 피복 또는 관입한 중생 내지 산성 화산암류들이 분포하고 있다. 또한 후기에 관입한 화강암류와 이들을 부정합으로 덮고 있는 제4기의 충적층이 분포하고 있다(Fig. 1). 부산지역의 지열수가 분포하는 해운대 지역의 모암은 유문암질암이며, 동래 지역의 지열수는 화강암류에서 산출된다. 유천층군에 속하는 유문암질암은 부산도폭에서 다른 암석에 비해 분포면적이 상당히 적은 편이나(장태우 등, 1983), 동래·월내도폭(손치무 등, 1978)으로 연결되어 상당히 넓게 분포하고 있다. 백색, 회백색 또는 회자색을 띠는 해운대 일대의 유문암질암은 반상조각이 뚜렷한 암상과 유사구조가 뚜렷한 암상으로 구분된다.

장산일대 분포하는 유문암질암은 부분적으로 유상구조를 보여주기도 하나 석영과 장석이 반정을 이루는 반상유문암으로 암편질용회암, 유문암질용회암을 덮고 있다. 장산의 남측부에 발달된 유문암질용회암은 회백색을 띠고, 석영과 장석입자가 다량 함유되어 있으며, 암편으로는 비현질유문암이 풍부하다. 암편의 크기는 3cm내외이고 기질과의 경계가 불투명하다. 아다멜라이트(adamellite)로 명명된 동래지역의 화강암류는 인접한 안산암과 화강섬록암, 각섬석화강암들을 관입해 있으며, 중앙부에는 마산암류의 한 분화체로 사료되는 토나라이트(tonalite)가 산성부근에서 관입암체로 분포하고 있다. 토날라이트는 주로 석영, 정장석, 사장석 및 흑운모 등으로 구성되어 있으며, 백운모, 녹니석, 각섬석, 자철석, 적철석 및 저어콘 등이 수반광물로 나타난다. 흑운모 또는 각섬석을 다량 함유한 분결체가 토날라이트내에 함유되어 있으며, 중립질 또는 세립질의 균질한 입상을 조직을 갖는다.

부산지역에 발달된 단층은 확인가능한 소규모 단층을 제외하면 확인이 용이하지 않은 추정단층들이다. 부산지역에서 서로 평행하게 발달되는 북북동-남남서 방향의 큰 계곡이 북쪽으로 연장되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 이들이 충적층에 의해 피복된 피복단층으로 서쪽에서부터 양산단층, 동래단층, 일광단층이다. 양산단층은 경주지역에서부터 남하하여 낙동강 하구까지 연장되어 발달되어 있으며, 약 N10°E의 주향을 가지

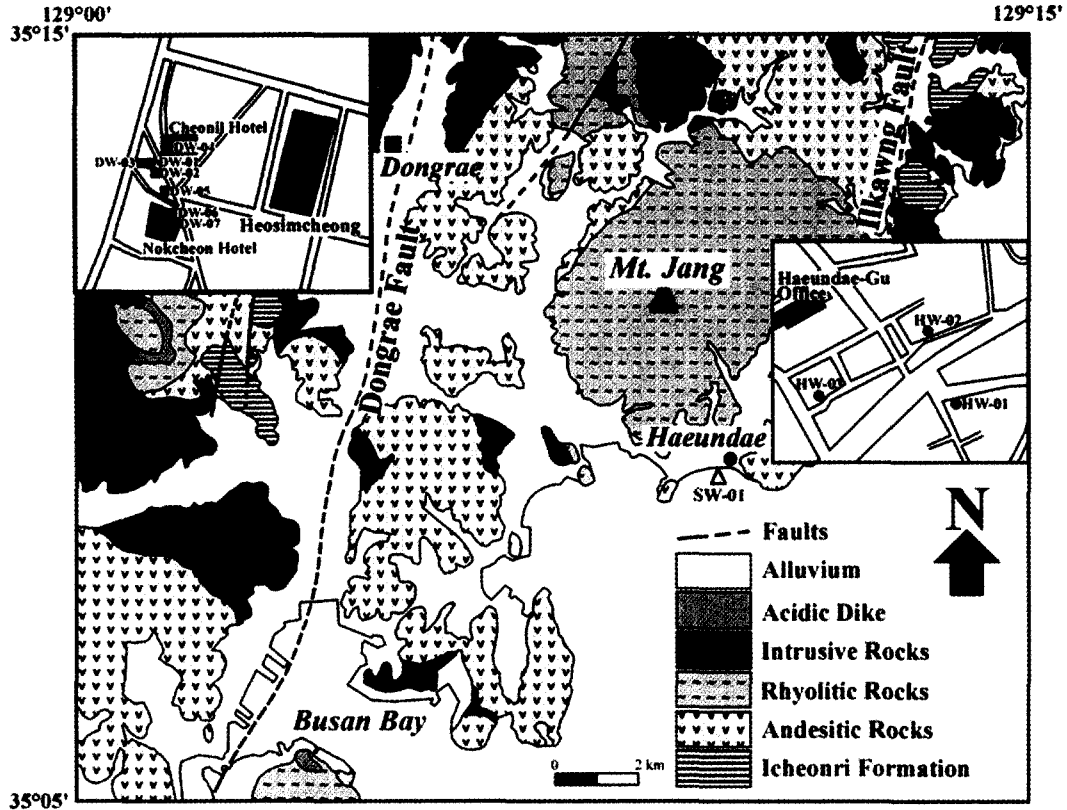


Fig. 1. Simplified and modified geological map of the Busan area (after Son *et al.*, 1978; Jang *et al.*, 1983). Sampling locations are also shown.

는 주향이동단층으로서 부산지역에서는 두꺼운 삼각주 충적층으로 피복되어 확인이 불가능하다. 동래단층도 충적층의 피복으로 확인할 수 없으나, 양산단층과 거의 평행하게 발달되어 있다. 일광단층은 항공사진이나 위성사진에 의해서 뿐만 아니라, 송정-기장선을 중심으로 하여 동부와 서부의 지질분포 차이에 의해 단층의 존재를 추정할 수 있다. 단층의 방향은 전술한 두 단층과 마찬가지로 북북동-남남서 방향의 주향을 가지며, 지형상으로도 특징적인 단층곡이 단층선을 따라 발달해 있다. 해운대 지열수는 장산의 남쪽 외곽부로서 일광 단층의 남서측에 위치하고 있으며, 동래 지열수는 금정산과 동래단층 사이에 위치하고 있다. 이와 같이 부산지역 지열수는 북북동-남남서 방향으로 발달된 단층대와 사교하며 발달되는 특징을 보여주고 있다.

### 3. 시료의 채취와 분석

부산지역 지열수의 지구화학적 특성과 기원을 연구

하기 위하여 1999년 10월과 11월에 걸쳐 해운대와 동래지역에서 현장조사와 함께 총 11개의 시료(지열수 10개, 해수 1개)를 채취하였다(Fig. 1). 지열수는 각 온천장으로 온천수를 공급하는 양탕장과 시설 온천공에서 채취하였으며, 해수는 해운대 해변에서 채취하였다. 온천공들의 채수심도는 해운대 지열수가 150~275 m, 동래 지열수가 110~150 m이며, 채수 지점까지 케이싱이 이루어져 천부지하수로부터 비교적 잘 격리되어 있다.

온도, pH, 산화-환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존 산소(DO) 등은 Orion사의 pH probe(9107WP), Combination redox electrode(9678BN), Conductivity cell (013010), DO probe electrode(083010) 등이 장착된 Multiparameter meter(Orion 1230)를 이용하여 현장에서 보정 후 채수와 동시에 측정하였으며, 알칼리도(alkalinity)는 산중화 적정법으로 측정하였다. 화학분석 및 동위원소 분석을 위하여 모든 시료는 간이 진공펌프를 이용하여 셀룰로스 질산염 여과지(0.45 μm)를 통

**Table 1.** Physicochemical characteristics of the water samples from the Busan area.

| Sample No.                         | Sampling Date | Depth (m) | T (°C) | pH   | Eh (mV) | EC <sup>(1)</sup> (S/cm) | DO <sup>(2)</sup> (mg/L) | Log PCO <sub>2</sub> <sup>(3)</sup> (atm) | TDS <sup>(4)</sup> (mg/L) | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | SiO <sub>2(aq)</sub> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-5)</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | F <sup>-</sup> | Br <sup>-</sup> |
|------------------------------------|---------------|-----------|--------|------|---------|--------------------------|--------------------------|---|---------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------|-----------------|
| <i>Thermal water from Haeundae</i> |               |           |        |      |         |                          |                          |   |                           |                 |                |                  |                  |                      |                 |                               |                                 |                              |                |                 |
| HW-01                              | Oct-19-99     | 150       | 55.1   | 7.32 | -77.1   | 6,520                    | 2.0                      | -2.77                                     | 3,390                     | 917.5           | 33.6           | 3.3              | 540.1            | 66.0                 | 1,654.0         | 125                           | 31                              | 1.8                          | 0.5            | 8.1             |
| HW-02                              | Oct-19-99     | 275       | 43.6   | 7.48 | -56.4   | 4,390                    | 3.6                      | -2.68                                     | 2,257                     | 615.1           | 22.4           | 1.7              | 335.2            | 59.7                 | 1,041.0         | 107                           | 61                              | 3.4                          | 0.6            | 4.8             |
| HW-03                              | Sep-17-99     | 250       | 40.0   | 7.78 | -33.9   | 3,915                    | 3.4                      | -3.00                                     | 3,379                     | 927.3           | 30.4           | 3.5              | 520.3            | 71.0                 | 1,631.0         | 118                           | 64                              | 0.6                          | 0.8            | 4.2             |
| <i>Thermal water from Dongrae</i>  |               |           |        |      |         |                          |                          |   |                           |                 |                |                  |                  |                      |                 |                               |                                 |                              |                |                 |
| DW-01                              | Oct-19-99     | 140       | 68.1   | 7.94 | -42.5   | 1,567                    | 2.4                      | -3.22                                     | 840                       | 262.1           | 8.1            | 0.1              | 70.5             | 52.0                 | 357.0           | 53                            | 31                              | 1.2                          | 1.6            | 1.6             |
| DW-02                              | Oct-19-99     | 120       | 63.0   | 7.82 | -172.8  | 1,432                    | 3.1                      | -2.96                                     | 788                       | 242.6           | 7.1            | 0.2              | 61.1             | 51.1                 | 322.0           | 49                            | 46                              | 4.4                          | 1.6            | 1.4             |
| DW-03                              | Oct-19-99     | 110       | 46.2   | 7.79 | -175.5  | 921                      | 2.9                      | -2.47                                     | 608                       | 168.2           | 4.6            | 0.2              | 37.1             | 43.4                 | 141.0           | 38                            | 165                             | 8.2                          | 0.4            | 0.6             |
| DW-04                              | Nov-18-99     | 130       | 59.3   | 7.80 | -127.4  | 1,441                    | 2.8                      | -2.91                                     | 740                       | 231.6           | 4.8            | 0.2              | 55.1             | 58.4                 | 282.0           | 48                            | 52                              | 4.6                          | 1.1            | 1.3             |
| DW-05                              | Oct-19-99     | 150       | 52.9   | 7.71 | -116.8  | 1,432                    | 2.0                      | -3.05                                     | 728                       | 219.4           | 7.3            | 0.2              | 56.4             | 47.9                 | 305.0           | 51                            | 34                              | 2.5                          | 1.2            | 1.3             |
| DW-06                              | Oct-19-99     | 136       | 56.4   | 8.08 | -85.1   | 1,443                    | 3.6                      | -3.20                                     | 770                       | 228.3           | 7.3            | 0.3              | 63.7             | 49.0                 | 302.0           | 48                            | 64                              | 2.8                          | 1.4            | 1.3             |
| DW-07                              | Nov-18-99     |           | 29.1   | 7.19 | -27.9   | 1,063                    | 3.9                      | -2.04                                     | 636                       | 153.2           | 2.9            | 0.7              | 71.4             | 46.9                 | 163.0           | 36                            | 156                             | <0.1                         | 0.5            | 0.7             |
| <i>Sea water</i>                   |               |           |        |      |         |                          |                          |   |                           |                 |                |                  |                  |                      |                 |                               |                                 |                              |                |                 |
| SW-01                              | Nov-18-99     |           | 16.9   | 8.24 | -52.1   | 50,356                   | 6.6                      | -3.37                                     | 33,722                    | 10,636.2        | 406.3          | 1,280.4          | 388.1            | < 0.05               | 19,020.0        | 1,773                         | 134                             | 6.4                          | 2.3            | 66.8            |

<sup>1)</sup>electrical conductivity; <sup>2)</sup>dissolved oxygen; measured by electrode; <sup>3)</sup>calculated from alkalinity and pH data, using computer code SOLVEQ (Reed, 1982); <sup>4)</sup>total dissolved solids= sum ions+silica; <sup>5)</sup>calculated from measured alkalinity by titration in situ

**Table 2.** Minor and trace element concentrations of the water samples from the Busan area.

| Sample No.                         | Sampling Date | Concentrations (µg/L) |       |      |       |       |       |       |     |      |     |       |       |      |       |       |       |  |  |  |
|------------------------------------|---------------|-----------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-----|------|-----|-------|-------|------|-------|-------|-------|--|--|--|
|                                    |               | Sr                    | Mn    | Al   | Li    | B     | Zn    | Ba    | Cr  | Cu   | Ge  | As    | Rb    | Mo   | Cs    | W     | U     |  |  |  |
| <i>Thermal water from Haeundae</i> |               |                       |       |      |       |       |       |       |     |      |     |       |       |      |       |       |       |  |  |  |
| HW-01                              | Oct-19-99     | 7,032                 | 217.3 | 63.3 | 334.6 | n.d.  | 306.4 | 342.7 | 4.8 | 24.7 | 2.1 | 23.9  | 242.7 | 12.1 | 170.3 | 2.5   | 0.8   |  |  |  |
| HW-02                              | Oct-19-99     | 4,586                 | 65.2  | 18.5 | 225.3 | 245.0 | 12.6  | 114.3 | 3.2 | 10.2 | 2.8 | 34.5  | 145.2 | 13.4 | 96.2  | 5.3   | 0.3   |  |  |  |
| HW-03                              | Sep-17-99     | 7,331                 | 10.1  | 1.1  | 33.4  | 139.0 | 33.9  | 17.9  | 0.2 | 1.0  | 0.3 | 2.4   | 21.0  | 1.3  | 15.4  | 0.2   | < 0.1 |  |  |  |
| <i>Thermal water from Dongrae</i>  |               |                       |       |      |       |       |       |       |     |      |     |       |       |      |       |       |       |  |  |  |
| DW-01                              | Oct-19-99     | 1,305                 | 0.7   | 53.7 | 125.2 | 91.9  | 8.0   | 20.2  | 1.5 | 4.0  | 2.3 | 4.7   | 32.7  | 30.0 | 28.6  | 3.5   | 0.9   |  |  |  |
| DW-02                              | Oct-19-99     | 1,123                 | 1.1   | 14.1 | 90.3  | 23.0  | 7.3   | 16.6  | 1.0 | 1.9  | 2.0 | 5.7   | 22.3  | 17.5 | 18.7  | 1.8   | 4.3   |  |  |  |
| DW-03                              | Oct-19-99     | 712                   | 3.7   | 10.9 | 111.3 | 112.0 | 71.5  | 11.3  | 5.2 | 3.0  | 1.7 | 0.5   | 18.1  | 8.8  | 15.1  | 1.2   | 13.2  |  |  |  |
| DW-04                              | Nov-18-99     | 1,056                 | 1.5   | 11.3 | 140.2 | 126.0 | 49.9  | 32.0  | 0.3 | 1.9  | 1.5 | 5.2   | 31.1  | 26.5 | 26.8  | 2.8   | 2.3   |  |  |  |
| DW-05                              | Oct-19-99     | 1,053                 | 2.4   | 24.3 | 95.6  | 123.0 | 85.5  | 169.4 | 2.9 | 9.0  | 1.7 | 6.5   | 21.1  | 18.9 | 18.2  | 7.6   | 8.0   |  |  |  |
| DW-06                              | Oct-19-99     | 1,225                 | 10.9  | 61.9 | 120.0 | 167.0 | 35.4  | 60.4  | 3.1 | 9.4  | 0.8 | 4.5   | 28.2  | 27.3 | 23.4  | 680.6 | 8.5   |  |  |  |
| DW-07                              | Nov-18-99     | 1,248                 | 1.9   | 10.9 | 85.1  | 80.2  | 133.1 | 17.1  | 1.6 | 1.5  | 1.1 | 1.7   | 12.4  | 31.4 | 8.6   | 0.6   | 13.7  |  |  |  |
| <i>Sea water</i>                   |               |                       |       |      |       |       |       |       |     |      |     |       |       |      |       |       |       |  |  |  |
| SW-01                              | Nov-18-99     | 7,582                 | 2.8   | 31.8 | 193.6 | 22.7  | 38.1  | 25.4  | 8.4 | 20.9 | 5.9 | 155.2 | 125.7 | 18.3 | < 0.1 | 0.5   | 3.2   |  |  |  |

과시켜 물 속에 존재하는 부유 물질을 제거하였으며, 이 중 양이온 분석을 위한 시료는 산화, 침전 및 흡착을 방지하기 위하여 농질산을 가해 pH를 2 이하로 유지하였다. 이 후 분석을 위해 폴리에틸렌 용기에 담아 운반에서 분석까지 냉장 보관하였다.

이상과 같이 처리한 시료의 주성분 및 미량원소 함량은 기초과학연구원 연구원에 의뢰하여 유도결합플라즈마 방출분석기(ICP-AES, ICPS-1000III; Shimadzu)와 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, PQ3STE; Fisons)로 분석하였으며, 음이온은 한국원자력연구소의 이온 크로마토그래피(IC, Dionex 500; Dionex)를 이용하여 분석하였으며, 오차범위는 ±5%이다.

4. 현장 측정자료

해운대 및 동래지역에서 채취된 지열수와 해수에 대한 현장 측정자료는 Table 1과 같으며, 각 지역의 지하수 자료는 심형수 등(2000)과 함세영 등(2000)의 자료를 이용하였다. 해운대와 동래 지열수의 온도는

각각 40.0~55.1°C와 43.3~68.1°C의 범위를 보여주며, 동래 지열수가 해운대 지열수에 비해 높은 값을 나타낸다. 사실 온천공에서 냉수용으로 개발된 지하수(DW-07)의 온도는 29.1°C이다. 지열수의 pH는 7.32~8.08로서 중성 내지 약알칼리성이며, 냉수용 지하수의 pH는 7.1로서 중성이다. 해운대 및 동래 지열수 주위에 채취된 지하수의 pH는 6.15~7.71로서 약산성 내지 중성으로서, 지열수의 pH가 지하수보다 높게 나타난다(심형수 등, 2000; 함세영 등, 2000). 연구지역 지열수와 지하수의 온도와 pH간의 상관관계를 살펴보면, 일반 지하수의 경우 좁은 온도 범위와 다양한 pH로 인하여 뚜렷한 상관관계를 보이지 않고 있으며, 지열수의 경우 온도가 증가함에 따라 pH가 증가하는 듯한 양상을 보이거나 뚜렷하지는 않다(Fig. 2).

연구지역의 산화-환원전위(Eh) 값은 지열수가 -27.9~-175.5 mV의 범위를 보이며, 해수는 -52.1 mV로서 모두 음의 값을 나타내고 있다. 온도와는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않으나, 해수와 동래 지열수 일부를 제

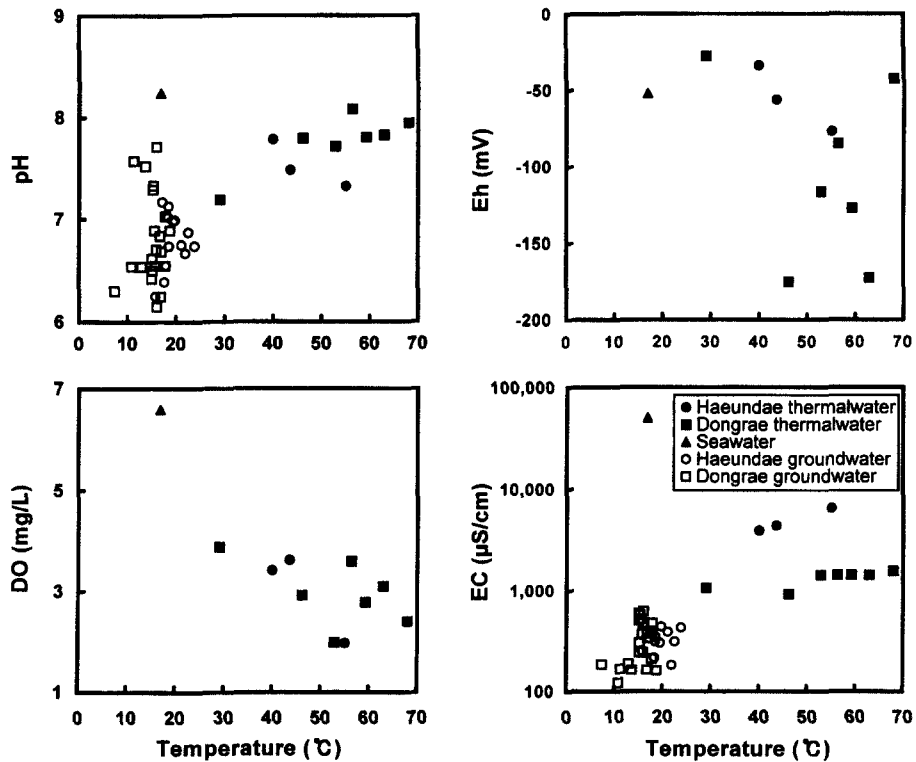


Fig. 2. Plots of pH, Eh, Do, and EC versus temperature of water samples from the Busan area. Groundwater data are from Shim et al. (2000) and Hamm et al. (2000).

외하면(DW-01, DW-03), 온도가 증가할수록 산화-환원 전위 값이 감소하는 양상을 보인다(Fig. 2). 용존산소(DO) 함량은 지열수의 경우 2.0~3.9 mg/L로서 해수(6.6 mg/L)에 비해 낮은 값을 보여주었다. 이 함량은 온도가 증가함에 따라 감소하는 뚜렷한 부의 상관관계를 보여주고 있다(Fig. 2). 이는 지열수가 심부에서 형성되는 동안 산소소모반응이 진행되었거나 지열수가 상승하는 동안 상대적으로 용존산소 함량이 높은 다른 기원의 지하수와 혼합되었을 가능성이 있음을 의미한다.

지열수의 전기전도도(EC)는 해운대 지열수(3,915~6,520  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )가 동래 지열수(921~1,567  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )보다 3~6배 정도 높은 값을 나타내었다. 지하수와 지열수 모두 온도가 증가함에 따라 전기전도도가 증가하는 정적 상관관계를 보여주었다(Fig. 2). 동래 지열수는 온도의 증가에 따른 전기전도도의 증가율이 낮은 반면, 해운대 지열수는 그 증가율이 상대적으로 높은 특징을 나타낸다. 부산지역 지열수의 pH는 좁은 범위를 가지고 있으나, 온도, 산화-환원전위, 용존산소, 전기전도도 값들은 크게 변화되고 있는 특징을 보여주고 있다. 이는 부산지역 지열수가 높은 용존이온함량을 가지고 있기 때문에 pH에 대한 완충력이 뛰어나기 때문으로 사료된다.

## 5. 용존이온의 분포 특성

부산지역 지열수 및 해수에 대한 주성분 원소의 조성은 Table 1에 표기된 바와 같이, 지열수의 총용존고체함량(TDS)은 해수(33,722 mg/L)보다는 낮으나 심형수 등(2000)과 함세영 등(2000)에 의해 보고된 주변 지하수(<500 mg/L)보다 높은 값을 나타내고 있다. 해운대 지열수의 총용존고체함량은 3,379~2,257 mg/L의 범위로서 동래 지열수의 608~840 mg/L의 범위보다 높은 값을 나타낸다. 이들의 주요 용존 양이온은 Na와 Ca이며, 주요 음이온은 Cl과  $\text{SO}_4$ 이다. 냉수용 지하수를 제외한 나머지 지열수의 K 함량은 해운대 지열수가 22.4~33.6 mg/L, 동래 지열수가 4.6~8.1 mg/L로서 모두 지하수보다 높게 나타난 반면, Mg 함량은 해운대(1.7~3.3 mg/L)와 동래(0.1~0.7 mg/L) 지열수 모두 주변 지하수에 비해 낮게 나타났다.  $\text{SiO}_2(\text{aq})$ 는 HW-01을 제외한 나머지 시료에서 43.4~71.0 mg/L의 범위를 나타내며, 주변 지하수와 비슷하거나 약간 높게 나타난다. 또한 미량원소 Sr, Li, B, Zn, Ba 등이 지열수에서 높은 함량을 나타낸다(Table 2).

이 결과를 파이퍼(Piper)의 삼각도에 도시하면 해수와 동일한 Na-Cl형에 도시된다(Fig. 3). 일부 시료를

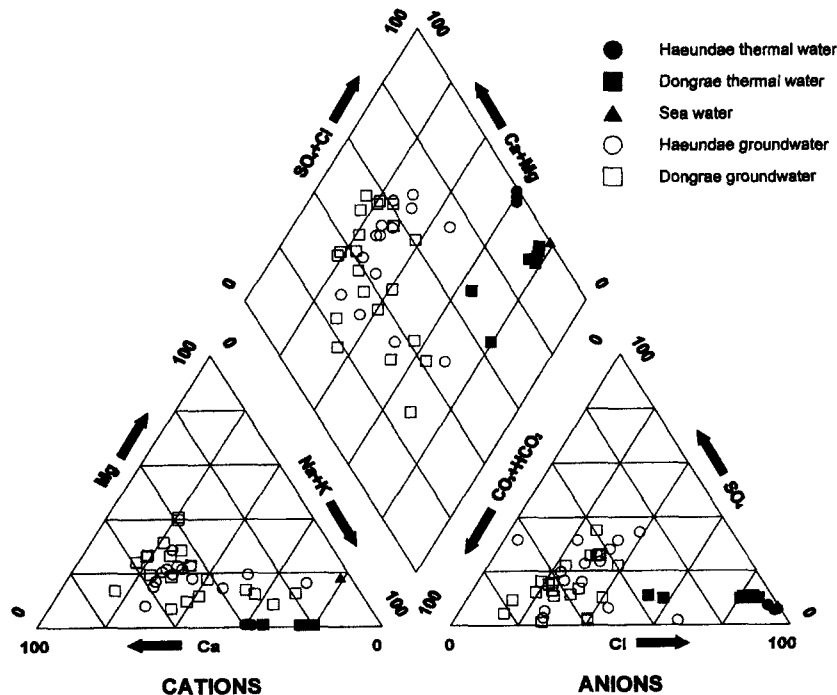


Fig. 3. Piper's diagram showing chemical compositions of water samples from the Busan area. Groundwater data are from Shim *et al.* (2000) and Hamm *et al.* (2000).

제외하면 동래 지열수는 해수와 근접한 영역에 도시되나, 해운대 지열수는 해수 및 동래 지열수와 확연히 구분되어 도시된다. 이는 해운대 지열수가 해수나 동래 지열수에 비해 상대적으로 Ca의 함량이 부화되어 있기 때문이다. 음이온은 HCO<sub>3</sub>의 농도가 높은 일부 동래 지열수(DW-03, DW-07)를 제외하면 해수와 지열수 모두 Cl이 가장 우세하며(>80%) 동일 영역에 도시된다. HCO<sub>3</sub>의 농도가 높은 두 지열수는 양탕장에서 수량 확보를 위해 개발한 지온의 온천수(DW-03)와 개인공에서 냉수용으로 개발된 지하수(DW-07)로서 지열수에 비해 온도와 염농도는 낮으나, 일반 지하수에 비해 염농도가 매우 높은 특성을 보인다. DW-03은 지열수에 비해 온도가 낮고 염농도가 낮으나, 여전히 높은 온도와 염농도를 지니고 있는 것으로 보아 일반 지하수와 혼합되어 온도의 감소가 함께 희석된 것으로 여겨진다. 또한 지열수의 영향을 받은 지하수가 상당수

존재하는 것을 고려할 때, DW-07은 지열수의 혼합이 있었던 것으로 여겨진다. 주변 지하수는 일부 Na-HCO<sub>3</sub>형에 도시되는 것을 제외하면 대부분이 Ca-HCO<sub>3</sub>형에 인접하게 도시되어 지열수와 구분된다. 이는 지열수와 지하수가 지하매질을 순환하는 동안 서로 상이한 지구화학적 환경을 거쳐 형성되었음을 지시한다.

이 지열수의 진화에 따른 주요 용존 이온들과 총용존고체함량과의 상관관계를 살펴보기 위하여 Fig. 4에 도시하였다. 지열수와 해수 및 주변 지하수는 총용존고체함량에 의해 뚜렷이 구분되며, 각 유형별 자연수의 총용존고체함량은 고유한 영역내에서 정의 상관관계를 보여 준다. 지열수의 이온 함량은 Mg를 제외하면 주변 지하수와 비슷하거나 높은 함량을 나타내며, 해운대 지열수의 Ca를 제외한 다른 이온함량은 해수보다 낮은 값을 나타낸다. 각 지열수의 SiO<sub>2</sub> 함량은 해수보다 상당히 부화되어 있어, 규산염 광물과의 활발

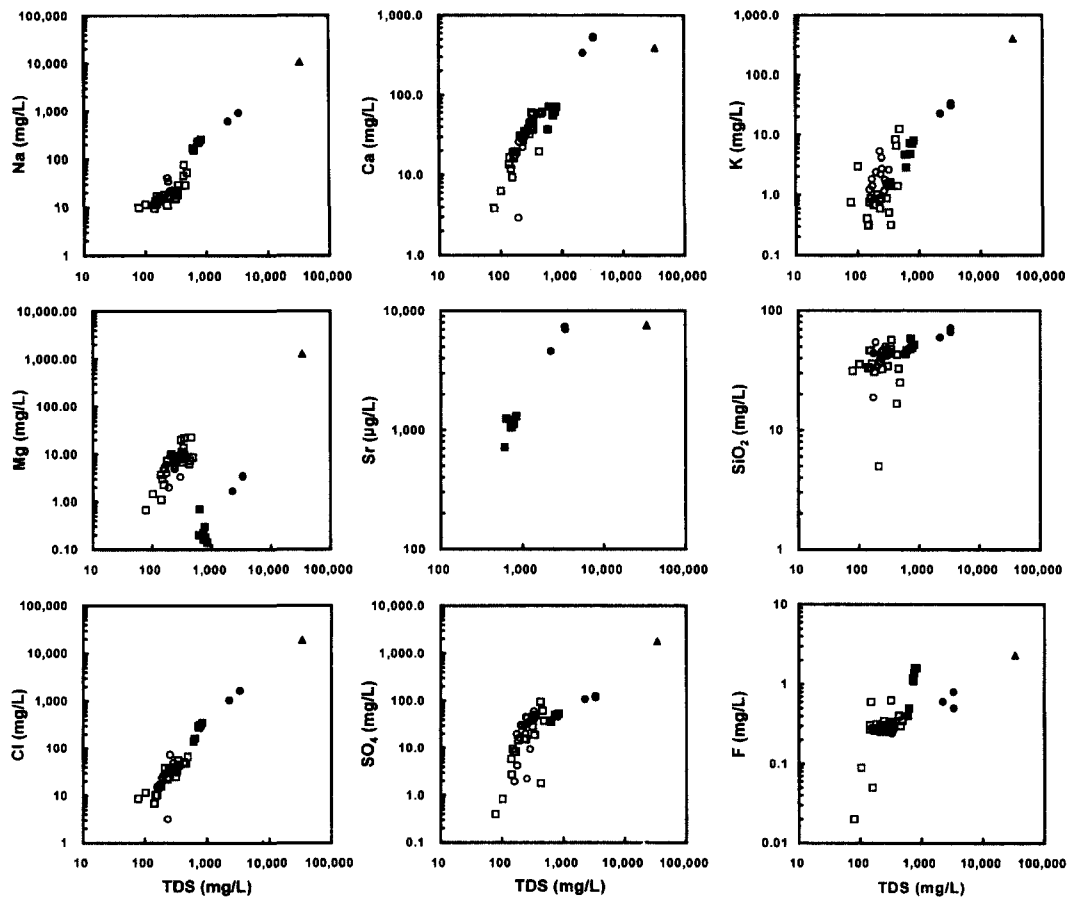


Fig. 4. TDS versus Na, Ca, K, Mg, Sr, SiO<sub>2</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, and F diagrams for water samples from the Busan area. Groundwater data are from Shim *et al.* (2000) and Hamm *et al.* (2000). Symbols are the same as in Fig. 2.

**Table 3.** Estimated reservoir temperatures of thermal waters from the Busan area, using various published geothermometers.

| Sample no.                         | pH  | In-situ Temp (°C) | Estimated temperature (°C) |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                     |                    |                    |                     |
|------------------------------------|-----|-------------------|----------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|                                    |     |                   | QC <sup>1)</sup>           | QA <sup>1)</sup> | CA <sup>1)</sup> | NaK <sup>1)</sup> | NaK <sup>2)</sup> | NaK <sup>3)</sup> | NaK <sup>4)</sup> | NaK <sup>5)</sup> | NaK <sup>6)</sup> | KMg <sup>6)</sup> | NaKCa <sup>7)</sup> | NaLi <sup>8)</sup> | NaLi <sup>9)</sup> | LiMg <sup>10)</sup> |
| <i>Thermal water from Haeundae</i> |     |                   |                            |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                     |                    |                    |                     |
| HW-01                              | 7.3 | 55.1              | 115.2                      | 114.1            | 86.4             | 143.7             | 102.6             | 110.9             | 132.1             | 99.8              | 163.0             | 111.3             | 90.8                | 30.1               | 103.9              | 191.7               |
| HW-02                              | 7.5 | 43.6              | 110.3                      | 109.8            | 81.0             | 143.4             | 102.3             | 110.5             | 131.8             | 99.5              | 162.8             | 109.6             | 83.3                | 30.2               | 104.1              | 193.8               |
| HW-03                              | 7.8 | 40.0              | 118.9                      | 117.3            | 90.4             | 137.0             | 94.7              | 103.5             | 125.6             | 92.2              | 156.6             | 107.7             | 88.4                | -40.8              | 31.3               | 318.1               |
| <i>Thermal water from Dongrae</i>  |     |                   |                            |                  |                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                     |                    |                    |                     |
| DW-01                              | 7.9 | 68.1              | 103.6                      | 104.1            | 73.9             | 133.5             | 90.6              | 99.6              | 122.2             | 88.3              | 153.2             | 116.1             | 74.7                | 41.2               | 114.7              | 167.3               |
| DW-02                              | 7.8 | 63.0              | 102.9                      | 103.5            | 73.0             | 130.0             | 86.5              | 95.8              | 118.7             | 84.3              | 149.8             | 108.4             | 72.6                | 30.9               | 104.7              | 185.4               |
| DW-03                              | 7.8 | 46.2              | 95.3                       | 96.9             | 64.9             | 126.8             | 82.8              | 92.3              | 115.6             | 80.8              | 146.8             | 95.3              | 66.1                | 55.9               | 128.5              | 179.0               |
| DW-04                              | 7.8 | 59.3              | 109.2                      | 108.9            | 79.8             | 111.0             | 64.7              | 75.2              | 100.2             | 63.4              | 131.5             | 99.2              | 62.3                | 51.7               | 124.6              | 165.6               |
| DW-05                              | 7.7 | 52.9              | 99.9                       | 100.9            | 69.8             | 137.5             | 95.3              | 104.0             | 126.1             | 92.8              | 157.1             | 106.3             | 74.1                | 37.3               | 110.9              | 187.2               |
| DW-06                              | 8.1 | 56.4              | 100.9                      | 101.7            | 70.9             | 135.2             | 92.6              | 101.5             | 123.8             | 90.2              | 154.9             | 102.0             | 72.0                | 45.4               | 118.6              | 184.2               |
| DW-07                              | 7.2 | 29.1              | 98.8                       | 100.0            | 68.7             | 105.8             | 58.9              | 69.6              | 95.1              | 57.7              | 126.4             | 67.7              | 39.5                | 47.9               | 121.0              | 218.5               |

QC (quartz, no steam loss), QA (quartz, steam loss) and CA (chalcedony)=silica geothermometers; others=alkali-ion geothermometers [Data sources: <sup>1)</sup>Fourmier (1981), <sup>2)</sup>Tonani (1980), <sup>3)</sup>Arnorsson (1983), <sup>4)</sup>Nieva and Nieva (1987), <sup>5)</sup>Truesdell (1976), <sup>6)</sup>Giggenbach (1988), <sup>7)</sup>Fourmier and Truesdell (1973), <sup>8)</sup>Fouillac & Michard (1981), <sup>9)</sup>Kharaka *et al.* (1982), <sup>10)</sup>Kharaka & Mariner (1989)]



한 반응이 진행되었음을 알 수 있다. 일반적으로 자연 수내 SiO<sub>2</sub> 함량은 석영과 비정질 실리카 용해도 값 사이에 분포하며, 온도에 따라 용해도 차이가 뚜렷이 나타난다. 지열수내 Na, K, Cl, SO<sub>4</sub> 등의 함량은 해수와 주변 지하수의 중간 범위 값을 나타내며, 증가양상이 유사하다. 지열수와 지하수의 F 함량은 좁은 총용존고체함량에 비해 크게 변화되고 있는 특징을 보이고 있다. 현장에서 측정된 온도, pH 및 알칼리도로부터 열역학적 수치 모델링 프로그램 SOLVEQ(Reed, 1982)를 이용하여 지열수 및 해수의 이산화탄소 분압(P<sub>CO2</sub>)을 구하였다. 지열수의 경우 10<sup>-2.47~3.22</sup> atm이며, 이는 대기와 접하는 해수의 이산화탄소 분압 10<sup>-3.37</sup> atm (이론치: 10<sup>-3.5</sup> atm)보다 높은 값을 보여주는 것이다 (Table 1).

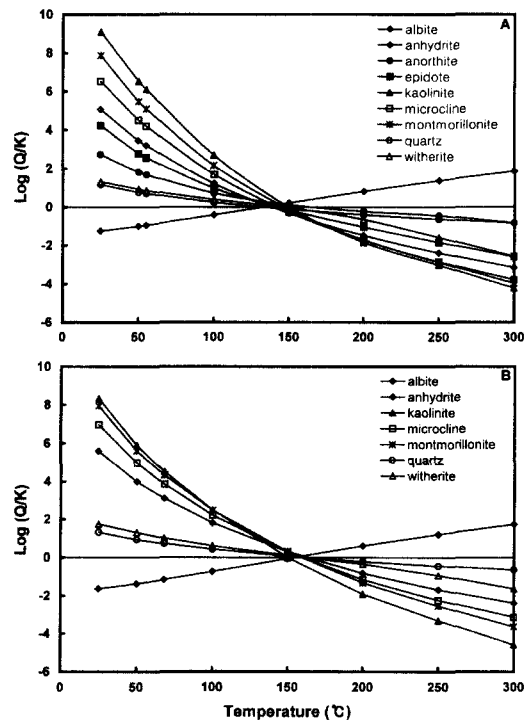
**6. 지열수의 생성온도**

지열수의 화학조성은 온도, 압력, 1·2차 광물과 투수성 등에 의해 지배된다. 심부에서 형성된 지열수가 2차 광물과 화학적 평형에 도달하였다면, 지열수 내 양이온의 비와 실리카의 농도는 온도와 순환하는 지열수와 자생광물과의 반응정도에 의해 조절된다(Fournier, 1981). 수용액 내 Na, K와 Ca의 농도는 온도에 따른 사장석, 운모류와 방해석 등과 평형반응에 의해 지배되며, 이들 양이온의 비를 기초로 몇몇 경험식을 이용하면 지열수의 저장지 온도를 추정할 수 있다(Table 3). 심부 저장지 온도에 대한 정보는 지열수의 진화에 대한 중요한 단서를 제공하게 되며, 광역적인 지구조와 지열구배에 대한 정보가 수반된다면 심부 저장지의 깊이를 구할 수 있을 것이다. 이들 양이온을 이용한 지질온도계의 문제점은 지열수가 상승하는 동안 지구화학적 재평형이 발생할 수 있다는 것이다. 즉, 유체가 상승하는 동안의 온도변화와 혼합작용은 광물들의 용해도에 영향을 주게 되고, 심부 저장지의 화학특성을 보존하기 어렵기 때문에, 지질온도계의 적용에는 세심한 주의가 요구된다. 그러나 이러한 문제점들이 있음에도 불구하고 지질온도계는 심부 저장지의 온도와 지열수의 진화를 해석하는데 유용한 도구로 활용되고 있다(Favara *et al.*, 1998; Mimi *et al.*, 1999; Marini and Susangkyno, 1999).

부산지역 지열수의 심부 저장지에 대한 실리카 (silica) 지질온도계는 석영 지질온도계가 95.3~118.9°C, 칼세도니(chalcedony) 지질온도계가 64.9~90.4°C의 범위로서 일부 이온 지질온도계보다 낮은

값을 보여준다. 지열수내에 함유되어 있는 이온을 이용한 알칼리 이온 지질온도계에 의해 계산된 심부 저장지의 온도는 대체로 실리카 지질온도계로부터 계산된 값보다 높은 값을 나타내나, 일부는 낮은 값을 나타내어 다양한 값을 보이고 있다. 특히, Li-Mg계 지질온도계가 Na-K계 등 다른 지질온도계에 비해 다소 높은 값을 보이고 있다. 이는 부산지역 지열수가 상승하는 동안 온도의 변화, 혼합작용 등과 같은 다양한 지구화학적 환경을 거쳐 현재의 화학조성을 가지게 된 것으로 해석될 수 있다. 김규한과 최현정(1998)은 해운대와 동래 지열수의 높은 Na 함량은 지열수에 해수기원의 Na가 혼합된 결과로 해석하였다. 만약, 지열수가 상승하는 동안 해수 성분의 Na가 혼입되었다면 Na를 이용하는 지질온도계는 증가된 Na의 함량으로 인하여 저장지의 온도를 과대평가하게 될 것이다. 이러한 오류를 방지를 방지하기 위해서는, 이온 지질온도계를 적용하기 전에 지열수를 배대한 지구화학적 환경에 대한 정확한 이해가 선행되어야 할 것이다.

Reed and Spycher(1984)는 지열수의 다성분 평형



**Fig. 5.** Log (Q/K) versus temperature for the geothermal water in Busan area.

상태를 계산하여 이를 화학지질온도계(chemical geothermometry)로 적용한 바가 있다. 이 방법은 지열수의 화학조성을 이용하여 지열수와 변질 광물이 평형을 이루는 온도를 계산함으로써 지열 저장지의 온도를 추정하는 것이다. 이 지질온도계는 지열계의 평형 상태에 대한 유용한 정보를 제공할 뿐만 아니라, 일부 이온들만을 고려한 이온 지질온도보다 더 타당한 심부 저장지의 온도를 추정할 수 있다(Pang and Reed, 1998). SOLVEQ(Reed, 1982)를 이용하여 부산지역 지열수의 대표성분(해운대: HW-01; 동래: DW-01)으로 다성분 평형상태의 온도를 추정하였다. 다성분 평형상태로부터 계산된 부산지역 지열수의 평형온도는 해운대 지열수가 130~150°C(Fig. 5A), 동래 지열수가 150~160°C(Fig. 5B)의 범위를 나타내고 있다. 다성분 평형상태의 온도와 알카리 이온 지질온도계로부터 구해진 온도를 비교해 보면, 일부 Na-K계 지질온도계를 제외하면 다성분 평형상태 온도가 Na-K, K-Mg, Na-K-Ca, Na-Li, Na-Li 지질온도계에 비해서는 다소 높은 값을 나타내며, Li-Mg 지질온도계보다는 낮은 값을 나타낸다. 만약 지열수가 상승하는 동안에 해수 기원의 Na의 유입이 있었다면, Na를 이용한 지질온도계로부터 계산된 온도는 평형상태의 온도보다 높은 값을 보여야 하나 대체로 낮은 값을 보여주고 있다. 이는 지열수가 상승하는 동안 상대적으로 Na의 농도가 낮은 지하수의 혼입으로 인하여 지열수 내 Na의 농도가 감소한 결과로 해석될 수 있다. Li-Mg 지질온도계가 평형상태의 온도보다 높은 값을 보이는 것도 상대적으로 높은 Mg의 함량을 가진 지하수의 혼입에 의한 결과로 해석될 수 있다.

## 7. 고 찰: 지열수의 기원과 진화

부산지역 지열수, 해수 및 지하수의 이온 함량 특성을 확인하기 위하여 핑거프린트 다이어그램(Fingerprint diagram; Schöller, 1954)에 도시하였다(Fig. 6). 지하수 성분(심형수 등, 2000; 함세영 등, 2000)은 해운대와 동래 지열수 주변 지하수의 평균값을 이용하였다. 해운대와 동래 지열수는 함량의 차이는 있으나 동일한 이온 함량 특성을 보이고 있으며, 해수와 지하수는 지열수와는 상이한 이온 함량 특성을 보이고 있다. 해수 중의 주요 양이온의 함량은 Na>Mg>Ca>K의 순으로 나타나지만, 지열수는 Na>Ca>K>Mg의 순으로 나타나 해수에 비해 Ca가 부화되어 있고 Mg가 결핍되어 있는 특징을 보여주고 있다. 지하수는 Ca>Na>Mg>K

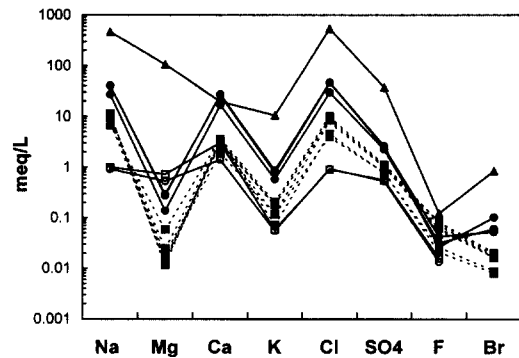


Fig. 6. Fingerprint diagram of water samples from the Busan area. Groundwater data used average values and are from Shim *et al.* (2000) and Hamm *et al.* (2000). Symbols are the same as in Fig. 2.

의 순으로 물-암석 반응의 결과를 반영하고 있으며, 지열수에 비해 Mg가 상대적으로 부화되어 있는 특징을 보인다.

동래 지열수는 지리적으로 해운대 지열수에 비해 내륙쪽에 위치하고 하고 있으며 화강암류에서 산출된다. 반면에 해운대 지열수는 바다에 인접해 있으며 유문암질암에서 산출된다. 이와 같이 서로 상이한 지리적·지질학적 환경에서 산출되는 두 지열수가 동일한 이온 함량 특성을 보이는 것은 기원적으로 유사한 지구화학적 환경에서 형성되어 진화하였음을 시사한다. 그러나 동래 지열수에 비해 해운대 지열수의 이온 함량이 높게 나타나는 뚜렷한 차이를 보여주고 있으며, 이는 후술한 바와 같이 지하수와 혼합비의 차이에 따른 현상이다. 해운대 지열수는 바다에 인접해 있어 내륙에 위치한 동래 지열수에 비해 상대적으로 해수의 영향을 더 많이 받을 수 있는 지리적 환경에 놓여 있다. 따라서 해운대와 동래 지열수의 혼합비의 차이는 두 지열수가 위치한 지리적 환경에 의한 것으로 여겨진다.

지열수내 Na, K, Cl, SO<sub>4</sub> 등의 함량은 해수와 주변 지하수의 중간 범위 값을 나타내며, 증가양상이 유사하다(Fig. 4). 이는 해운대 및 동래 지열수가 해수의 영향을 받았음을 보여주는 좋은 증거이다. 지열수가 형성된 후 상승과정에서 단순한 해수와 혼합에 의한 결과라면 해수의 주성분인 Mg와 Ca도 동일한 경향을 보여야 한다. 그러나 Mg는 해수와 지하수에 비해 결핍되어 있고 Ca는 해수에 비해 상대적으로 부화되어 있어 단순한 해수의 혼합에 의한 영향으로 해석하기는 힘들다. 특히, 해운대 지열수의 Ca 함량과 Ca와 유사한 거동특성을 가지는 Sr의 함량이 해수와 유사한 값을 보

이고 있다. 따라서 부산지역 지열수에 대한 이전의 연구결과와 지구화학적 특성을 고려하여 염농도의 기원에 대한 가능한 반응들을 설정해 보면 다음과 같다.

반응I: 심부로 순환하던 해수가 150°C 이상으로 가열된 후, 지표로 상승하는 동안 모암과의 접촉에 따른 열전도에 의한 냉각

반응II: 심부로 순환하는 천수기원의 지하수가 150°C 내외로 가열된 후, 지표로 상승하는 동안 해수와의 혼합에 따른 염농도 증가와 냉각

반응III: 심부로 순환하던 해수와 천수기원의 지하수가 혼합되어 150°C 내외에서 암석과의 상호반응을 거친 후, 지표로 상승하는 동안 천부기원의 지하수와의 혼합에 따른 희석과 냉각

반응IV: 심부로 순환하던 가열된 고온의 해수가 암석과의 상호반응을 거친 후 주변 지하수와의 혼합에

의해 150°C 내외에서 재평형이 된 후, 지표로 상승하는 동안 천부기원의 지하수와의 혼합에 따른 희석과 냉각

반응I에 의해 부산지역 지열수가 형성되었다면 Cl의 농도가 해수와 유사한 값을 가져야 하나, 해운대와 동래 지열수의 Cl 농도는 해수에 비해 상당히 낮은 값을 가지므로 그 가능성이 매우 희박하다. 또한 부산지역 지열수의 형성 이후 현생 해수의 혼합에 의해 염농도가 증가되었다고 전제했을 경우(반응II), 지열수의 형성 이후 단순한 혼합이라면 해수와 지열수간에는 온도와 주요 용존이온들 사이에 직선적인 부의 상관관계를 보여야 한다. 온도와 주요 이온들간의 상관관계를 살펴 보기 위하여 Fig. 7에 도시하였다. 부산지역 지열수의 주요 Mg만이 부의 상관관계를 보이고, 다른 주요 이온들은 온도가 증가함에 따라 농도가 대체로 증가하는

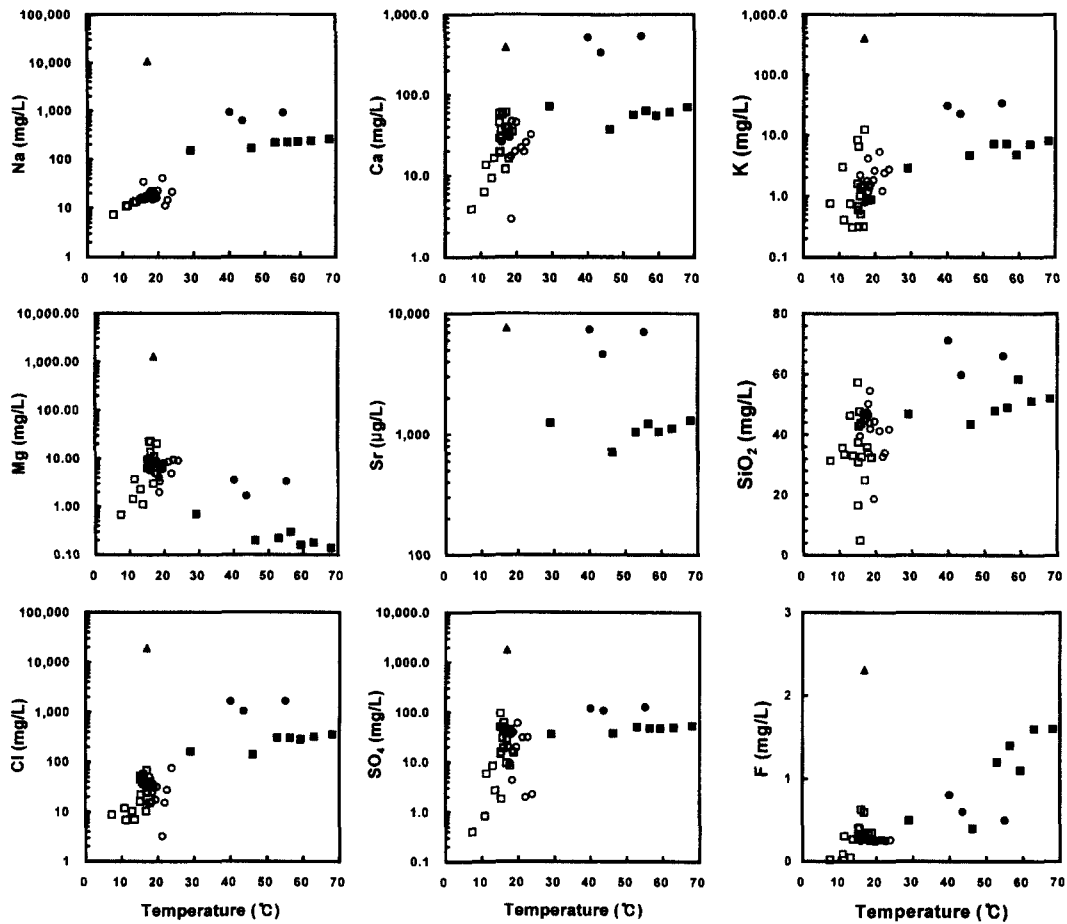


Fig. 7. Temperature versus Na, Ca, K, Mg, Sr, SiO<sub>2</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, and F diagrams for water samples from the Busan area. Groundwater data are from Shim *et al.* (2000) and Hamm *et al.* (2000). Symbols are the same as in Fig. 2.



약 22:1의 비율로 혼합된 후 150°C 내외에서 불-암 석 반응이 진행되었거나 재평형이 이루어진 것으로 추정할 수 있다.

8. 결 언

해운대와 동래에서 산출되는 지열수는 Na-Cl형으로서 한반도의 다른 지역에서 산출되는 지열수에 비해 전기전도도와 총용존고체함량이 비교적 높은 것이 특징이다. 지열수와 해수 및 주변 지하수는 총용존고체 함량에 의해 뚜렷이 구분되며, 지하수의 SiO<sub>2</sub> 함량만이 총용존고체함량과 뚜렷한 상관관계를 보이지 않을 뿐 각 유형별 자연수는 고유한 영역내에서 정의 상관관계를 보여준다. 지열수의 이온 함량은 Mg를 제외하면 주변 지하수와 비슷하거나 높은 함량을 나타내며, 해운대 지열수의 Ca를 제외한 다른 이온함량은 해수보다 낮은 값을 나타낸다. 부산지역 지열수와 주변 지하수의 SiO<sub>2</sub> 함량은 서로 유사한 범위를 가지며 해수보다 상당히 부화되어 있어, 규산염 광물과의 활발한 반응이 진행되었음을 알 수 있다.

온도와 주요 이온들간의 상관관계를 살펴보면, 해운대 지열수의 주요 이온들은 온도와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는 반면, 동래 지열수는 Mg를 제외한 주요 이온들이 온도가 증가함에 따라 농도가 대체로 증가하는 약한 정의 상관관계를 보여주고 있다. 해운대와 동래 지열수는 함량의 차이는 있으나 동일한 이온 함량 특성을 보이고 있으며, 해수와 지하수는 지열수와는 다소 상이한 이온 함량 특성을 보이고 있다. 해수 중의 주요 양이온의 함량은 Na>Mg>Ca>K의 순으로 나타나지만, 지열수는 Na>Ca>K>Mg의 순으로 해수에 비해 Ca가 부화되어 있고 Mg가 결핍되어 있는 특징을 보여주고 있다. 지하수는 Ca>Na>Mg>K의 순으로 물-암석 반응의 결과를 반영하고 있으며, 지열수에 비해 Mg가 상대적으로 부화되어 있는 특징을 보인다. 해운대와 동래 지열수의 Br함량은 모두 해수보다 낮은 값을 보이며, 온도가 증가함에 따라 모두 증가하는 정의 상관관계를 보인다. 이러한 특징은 부산지역 지열수가 단순한 해수의 혼합이 아닌 다른 지구화학적 환경에 의해 형성되었음을 시사하며, 주변 지하수의 혼합에 의해 염농도와 수온의 감소가 일어났을 가능성을 시사한다.

부산지역 지열수와 해수 및 주변 지하수의 지구화학적 특성을 종합해 보면, 심부로 순환하는 해수가 주변 모암과의 상호반응에 의해 해수에 비해 상대적으로 증

가된 Ca와 Sr의 함량과 상대적으로 결핍된 Mg, Na와 K의 함량을 가지는 지열수를 형성한 것으로 여겨진다. 또한 주요 이온들과 온도와의 상관관계로 볼 때, 염도의 지열수가 상승하는 동안 저온의 주변 지하수와 혼합되어 냉각과 함께 희석작용이 있었던 것으로 여겨진다. 만약, 염농도가 지열수의 형성 이후 해수의 혼합이 아닌 심부로 순환하는 해수와의 반응에 의해 증가되었다면, 현생 해수보다는 고기해수에 의한 영향이 더 컸을 것으로 사료된다. 그러나, 지구화학적 특성만으로 이러한 가능성을 확정하기는 힘들며, 부산지역 지열수의 기원과 진화를 정확히 규명하기 위해서는 동위원소 연구와 함께 전체 지구화학계에 대한 물-암석 반응 모델링이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 성규열의 박사학위논문 일환으로 부경대학교 발전기금재단과 과학기술부 원자력 중장기 연구개발과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사한다. 아울러 심사과정에서 중요한 관점에 대하여 지적과 수정을 해 주신 충남대학교 이찬희 박사님과 익명의 심사위원께 감사를 드린다. 또한 시료 채취에 협조를 해 주신 부산광역시 상수도사업본부와 국제탕, 녹천호텔, 중앙여관, 천일호텔에 감사를 드린다.

참고문헌

고용권, 윤성택, 김천수, 배대석, 박성숙 (2001) 부곡 지열수의 심부환경과 지하학적 진화: 유황형 지열수의 생성과정 재해석. *자원환경지질*, 34권, p. 329-343.  
 김건영, 고용권, 김천수, 배대석, 박맹연 (2000) 유성 지역 지열수의 지구화학적 특성 연구. *지하수환경*, 7권, p. 32-46.  
 金奎漢, 中井信之 (1981) 韓國의 溫泉水의 水素, 酸素および 黃 同位休比. *地球化學*, 15卷, p. 6-16.  
 김규한, 최현정 (1998) 남한의 온천지역의 열수와 지하수의 지구화학적 연구. *지구과학회지*, 19권, p. 22-34.  
 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식 (1978) 한국지질도 동래·월래도폭(1:50,000) 및 도폭설명서. *국립지질조사소*, 27p.  
 심형수, 함세영, 성익환, 이병대, 조병욱, 황진연 (2000) 부산 해운대지역 지하수와 지열수의 수리화학적 특성. *한국환경과학회지*, 9권, p. 241-252.  
 염병우, 김용제 (1999) 수안보지역의 온천수위 변동과 수리지구화학에 관한 연구. *지하수환경*, 6권, p. 59-65.  
 이동영, 임정웅 (1995) 동래온천의 수리지질학적 특성과 수위변화. *자원환경지질*, 28권, p. 165-176.  
 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우 (1983) 한국지질도 부산·가덕도폭(1:50,000) 및 도폭설명서. *한국동력자원연구소*, 21p.

- 함세영, 조명희, 황진연, 김진섭, 성익환, 이병대 (2000) 부산 금정산-백양산 일대 용천수, 지하수 및 지열수의 지화학적 특성. *한국환경과학회지*, 9권, p. 229-239.
- Arnorsson, S. (1983) Chemical equilibria in Icelandic geothermal system. Implications for chemical geothermometry investigation. *Geothermics*, v. 12, p. 119-128.
- Chave, K.E. (1960) Evidence on history of sea water from chemistry of deeper subsurface waters of ancient basins. *A.A.P.G. Bull.*, v. 44, p. 357-370.
- Favara, R., Grassa, F., Inguaggiato, S. and D'Amore, F. (1998) Geochemical and hydrogeological characterization of thermal springs in Western Sicily, Italy. *Jour. Volcanology and Geothermal Research*, v. 48, p. 125-141.
- Fouillac, C. and Michard, G. (1981) Sodium-lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, v. 10, p. 55-70.
- Fournier, R.O. (1981) Application of water geochemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. In Rybach, L. and Muffler, L.J.P. (ed.), *Geothermal System: Principles and Case Histories*, John Wiley, New York, p. 109-143.
- Fournier, R.O., and Truesdell, A.M. (1973) An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 43, p. 1543-1550.
- Giggenbach, W.F. (1988) Geothermal solute equilibria: Derivation of Na-K-Ca-Mg geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 48, p. 2693-2711.
- Han, S.J., Hamm, S.Y., Sung, I.H., Lee, B.D., Cho, B.W., and Cho, M.H. (1999) Geochemical characteristics of geothermal water and groundwater in the Dongrae hot-spring area. *Jour. Engineering Geology*, v. 9, p. 207-225.
- Han, W. (1979) A preliminary evaluation of geothermal potential of Korea with emphasis on geothermometer and mixing model. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 18, p. 259-268.
- Huttrer, G.W. (2001) The status of world geothermal power generation 1995-2000. *Geothermics*, v. 30, p. 1-27.
- Kharaka, Y.K., Lico, M.S. and Law, L.M. (1982) Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins. *Am. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, v. 66, 558.
- Kharaka, Y.K., and Mariner, R.H. (1989) Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basin. In Naeser N.D., and McCulloch, T. (ed.), *Thermal History of Sedimentary Basins*, Spinger-Verlag, New York, p. 99-117.
- Marini, L. and Susangkyono, A.E. (1999) Fluid geochemistry of Ambon Island (Indonesia). *Geothermics*, v. 28, p. 189-204.
- Mimi, A.L., Dhia, H.B., Bouri, S., Lahrach, A., Abidate, L.B. and Bouchareb-Haouchim, F.-Z. (1999) Application of chemical geothermometers to thermal springs of the Maghreb, North Africa. *Geothermics*, v. 27, p. 211-233.
- Nieva, D., and Nieva, R. (1987) Developments in geothermal energy in Mexico, Par 12-A cationic composition geothermometer for prospection of geothermal resources. *Heat Recovery and CHP*, v. 7, p. 243-258.
- Pang, Z.H., and Reed, M.H. (1998) Theoretical chemical thermometry on geothermal waters: Problems and methods. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 62, p. 1083-1091.
- Reed, M.H. (1982) Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and an aqueous phase. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 46, p. 513-528.
- Reed, M.H. (1986) Diagenetic reaction between seawater and arkosic sand. *Fifth International Symposium on Water-Rock Interaction*, Reykjavik, Iceland, 1986, Extended Abstracts, p. 454-457.
- Reed, M.H., and Spycher, N.F. (1984) Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 48, p. 1479-1492.
- Schöller, H. (1954) *Arid Zone Hydrology-Recent Developments*. UNESCO, Paris.
- Tonani, F. (1980) Some remarks on the application of geothermal techniques in geothermal exploration. In *Proc. Adv. Eur. Geoth. Res., Second Symp.*, Strasbourg, p. 428-443.
- Truesdell, A.H. (1976) Geochemical techniques in exploration. Summary of section III. *Proc. Sec. United Nations Symp. Develop. Use Geother. Res.*, v. 1, p. 53-78.
- White, D.E. (1965) Saline waters of sedimentary rocks. *A.A.P.G. Mem. no. 4*, p. 342-366.
- Yun, S.T., Koh, Y.K., Choi, H.S., Kim, C.S., and So, C.S. (1998a) Geochemistry of geothermal waters in Korea: Environmental isotope and hydrochemical characteristics I. Bugok area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 31, p. 185-199.
- Yun, S.T., Koh, Y.K., Choi, H.S., Youm, S.J., and So, C.S. (1998b) Geochemistry of geothermal waters in Korea: Environmental isotope and hydrochemical characteristics II. Jungwon and Munkyeong area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 31, p. 201-213.