

지하수 조사에서 환경추적자로서의 SF₆의 적용

고동찬 · Niel Plummer* · Eurybiades Busenberg* · 김용제

한국지질자원연구원

*U. S. Geological Survey

dckoh@kigam.re.kr

요 약 문

SF₆ (Sulfur Hexafluoride) is a gaseous compound whose use is being greatly increased recently. The compound has a negligible background concentration from natural sources and is stable in most of groundwater environments. Therefore, SF₆ has potential for a dating tool for young groundwater. It has many advantages over chlorofluorocarbons (CFCs) for groundwater investigation that sampling procedure is much simpler than CFCs and its growth is continued up to at least near future in the atmosphere. However, solubility of SF₆ is so low that excess air causes large uncertainties in recharge date of groundwater. To compensate the limitation, N₂/Ar method can be employed to estimate excess air content. A groundwater study is currently carrying out in Jeju Island using SF₆ as an environmental tracer. Well waters and spring waters were sampled for SF₆ and N₂/Ar. To establish SF₆ input history in the study area, air sampling is being conducted in the area near the center of the island on a monthly and weekly basis. Based on the present data, the level of SF₆ concentration in the atmosphere of the Island is corresponding to the trend of the Northern Hemisphere.

key word : environmental tracers, SF₆, atmospheric concentration, groundwater sampling, N₂/Ar

1. 서론

Sulfur Hexafluoride(SF₆)는 무색, 무취, 불연성, 비독성의 안정한 기체로 우수한 전기 절연성을 가지고 있다. 이 화합물은 주로 고압의 전기스위치나 변압기에서 전기 절연재로 이용되며 마그네슘 금속 생산에서도 이용된다. SF₆의 공업적 생산은 1953년에 시작되었으며 연간생산량은 1995년에 85,700톤으로 늘어났다. 대기 중의 SF₆ 수준은 (1) 대기에서의 긴 체류기간, (2) 낮은 물에 대한 용해도, (3) 토양층에서의 높은 안정성, (4) 자연적인 저장원(sink)의 부재 등으로 인해 급격히 증가하였다 (Busenberg and Plummer, 2000). 대기의 SF₆ 농도는 1976년에 0.6 pptv에서 1999년에 4 pptv 이상으로 증가하였다 (Maiss and Brenninkmeijer, 1998).

대기중의 빠른 농도 증가, 알려진 대기 농도 이력, 토양에서의 안정성, 비교적 간단한 분석 및 시료 채취 등으로 인해 SF₆는 최근에 함양된 지하수를 연구하는 환경추적자로 연구되고 있다. SF₆는 생분해가 잘 되지 않고 유기물에 잘 흡착되지 않는다. 또한 SF₆는 고무나 플라스틱류에 잘 흡착되지 않으므로, 시료 채취 과정에서 이러한 물질에 의해 오염될 가능성이 적다. 그러나 SF₆를 이용한 지하수 연령 측정에는 자연적인 근원과 함양될 때에 포함되는 과잉 공기(excess air)에 의해 해석이 복잡해질 수 있다 (Busenberg and Plummer, 2000). CFCs (Chlorofluorocarbons)의 경우에는 과잉 공기에 의한 영향이 적지만, SF₆는 CFCs보다 용해도가 훨씬 작으므로 과잉 공기에 의해 지하수의 SF₆ 농도가 영향을 크게 받게 된다. 과잉 공기에 의한 SF₆의 영향을 평가하기 위해서 지하수의 N₂/Ar (Busenberg and Plummer, 2000) 또는

Ne의 농도(Bauer et al., 2001)를 조사하여 이들의 물에 대한 용해도를 비교함으로써 과잉 공기의 양을 결정하고, 이를 이용하여 지하수의 SF₆ 농도 중에서 과잉 공기에 의한 SF₆의 양을 계산할 수 있다.

지하수의 SF₆은 가스 크로마토그래피를 이용하여 분석할 수 있다. SF₆는 CFCs와 같은 purge and trap 전처리 장치와 electron capture detector를 이용하게 되지만, CFCs보다 일반적으로 지하수의 농도 수준이 월등히 낮기 때문에 지하수 시료에서의 추출에 더 긴 Trap을 이용해야 하고, 검출기의 배경신호의 안정성을 유지하도록 해야 한다 (Busenberg and Plummer, 2000).

SF₆는 최근에 ³H, CFCs 등과 함께 여러 환경추적자 (multi-tracer)를 이용하여 지하수의 연령을 결정하는 연구나 (Bauer et al., 2001, Plummer et al., 2001) 수치모형을 검증하는 자료로 이용되었다 (Zoellmann et al., 2001). SF₆는 환경추적자로서만이 아니라, 인위적인 추적자로도 이용되어 왔다. 지열 저류지에서 지하수의 유동에 대한 추적자로 이용되었으며 (Upstill-Goddard and Wilkins, 1995), 해안변에서 지하수와 지표수의 반응 관계를 연구하는 목적으로도 이용되었다 (Dillon et al., 1999).

제주도 지역의 지하수 연령 측정을 위해 SF₆ 및 N₂/Ar 분석을 위한 지하수를 채취하였다. 여기서는 이에 관한 현장 조사 기술 및 자료 해석에 관해 발표하고자 한다.

2. 본론

지하수의 SF₆ 분석을 위해서는 비교적 많은 양의 지하수 시료를 필요로 한다. 대기 중의 SF₆ 농도가 낮고, SF₆의 물에 대한 용해도가 작기 때문이다. 일반적으로 2.5 - 4L 정도의 부피로 시료를 채취하게 된다. 시료는 출수구를 용기의 바닥에 위치시키며, 충분한 양을 흘려 보낸 뒤에 conical liner를 이용하여 빈공간 (headspace)없이 채취하게 된다. 이번 연구에서는 2.5L safety glass bottle (Wheaton)과 Polyseal liner (Thomas Scientific)을 이용하여 시료를 채취하였다. 온도 변화에 의해 지하수가 팽창할 수 있는 경우에는 시료 용기의 마개를 주기적으로 풀어줄 필요가 있다.

지하수의 과잉 공기의 양을 추정하기 위해 SF₆ 시료의 채취와 함께 N₂/Ar 분석용 시료도 채취하였다. N₂/Ar용 시료는 160mL 유리병에 지하수 시료를 채취하였다. 이 때, 빈 공간을 없애고, 여분의 시료를 배출하기 위해 rubber stopper에 syringe needle을 꽂아 시료용기를 닫고, needle을 제거한 후에 시료를 완성한다. 이 과정은 물속에서 행해져서 대기에 시료가 노출되지 않도록 하였다. 시료는 중복시료로 채취하였다.

SF₆를 이용한 지하수 연령 측정은 지하수시료에서 측정된 SF₆의 농도와 SF₆의 물에 대한 용해도를 이용하여 C* (equivalent atmospheric concentration)을 구하고, 이를 대기의 농도 이력 곡선과 비교하여 함양 시기의 일차 추정값을 결정한다. 과잉 공기에 의한 SF₆의 보정 과정은 다음과 같다. 일차 추정된 함양시기에 지하수가 함양되고 이때 과잉 공기도 포함되었다고 가정하고 지하수의 SF₆ 전체 농도에서 과잉 공기에 의해 지하수에 포함된 SF₆의 농도를 제거하여 용해에 의한 SF₆의 농도만을 결정한다. 이를 다시 대기 농도 곡선과 비교하여 함양 시기에 대한 추정값을 다시 결정하게 된다. 더 이상 함양 시기가 변하지 않을 때까지 이 과정을 반복하여 지하수 연령을 결정한다. 과잉 공기는 일반적으로 3 cm³/kg이상 포함되지 않으므로, 이 범위에서 과잉 공기에 의한 SF₆의 지하수 연령 측정 오차는 지하수 온도가 10℃이고 지하수 함양 고도가 해발고도 0m일 때 2년에서 5년정도이며, 지하수의 연령이 작을수록 오차가 커진다. 같은 조건에서 CFC-12가 1990년 이전에 함양된 지하수에 대해 과잉 공기에 의한 연령 오차가 1년 이내인 것에 비교하면 이러한 오차는 비교적 큰 편이다.

비포화대에 의한 지하수 연령 오차는 대기중의 SF₆가 확산에 의한 이동 (diffusive

transport)만 일어난다고 하면 CFC-12와 유사한 수준이다. SF₆는 미생물 활동에 의해 거의 분해가 일어나지 않는다. CFCs가 분해될 수 있는 혐기성 환경에서도 SF₆는 잔류하는 것으로 알려져 있다 (Busenberg and Plummer, 2000).

SF₆는 CFCs와는 달리 일반적인 생활 용품에 포함되지 않으며, 대규모 산업시설에서 집중적으로 사용되지 않아 지역 특성에 따른 국지적인 대기 중의 농도 증가는 크지 않다. 그러나 조사 지역에서의 대기 중의 농도가 북반구 평균 농도와 같은 수준을 가지는지 확인할 필요가 있다. 이를 위해 제주도 지역의 중심부에 가까운 1100고지 부근에서 2002년 6월부터 매달 대기 시료를 채취하여 SF₆의 농도를 측정하고 있다. 또한 단기적인 대기중의 농도변화를 관측하기 위해, 2003년 1월부터 3월까지 3개월동안 매주 시료를 채취하여 대기 중의 변화를 조사하고 있다. 2002년 6월부터 2002년 10월까지의 자료를 보면 제주도 지역에서의 대기중의 SF₆ 농도는 Maiss 와 Brenninkmeijer (1998)에 의해 제시된 북반구 평균 농도 추세와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 이 농도 이력을 지하수 연령 측정에 이용할 때 큰 오차가 유발되지 않는다고 할 수 있다.

3. 결론

SF₆는 비교적 최근에 지하수 유동에 대한 환경추적자로서 이용되기 시작하였다. CFCs등의 추적자에 비해 비교적 시료채취와 분석이 용이하고, 앞으로 장기적으로 이용될 수 있으므로 많은 가능성이 있는 환경추적자라고 할 수 있다. 제주도 지역에서 SF₆를 이용하여 지하수 연령 측정을 하기위해 SF₆ 및 N₂/Ar 분석을 위한 지하수 시료를 채취하여 조사하였다. SF₆를 이용한 지하수 연령 측정에 위한 자료 해석 기법 및 이에 영향을 줄 수 있는 요소들을 분석하였다. 또한 조사 지역에서의 대기중의 농도 이력을 북반구 평균 농도 이력과 비교하기 위해 월간 대기 시료를 채취하여 조사하였다. 현재까지의 5개월동안의 결과로 볼 때 조사지역과 북반구 평균 대기 농도는 거의 같은 추세를 알 수 있다.

4. 사사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원 (과제번호 3-2-1)에 의해 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- Busenberg, E. and Plummer, L.N., 2000. Dating young groundwater with sulfur hexafluoride: natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. *Water Resour. Res.* 36, 3011-3030.
- Maiss, M., Brenninkmeijer, C.A.M., 1998. Atmospheric SF₆: trends, sources, and prospects. *Environ. Sci. Technol.* 32, 3077-3086.
- Bauer, S., Fulda, C., Schafer, W., 2001. A multi-tracer study in a shallow aquifer using age dating tracers ³H, ⁸⁵Kr, CFC-113 and SF₆ - indication for retarded transport of CFC-113. *J. Hydrol.* 248, 14-34.
- Plummer, L.N., Busenberg, E., Bohlke, J.K., Nelms, D.L., Michel, R.L., Schlosser, P., 2001. Groundwater residence times in Shenandoah National Park, Blue Ridge Mountains, Virginia, USA: a multi-tracer approach. *Chem. Geol.* 179, 93-111.
- Zoellmann, K., Kinzelbach, W., Fulda, C., 2001. Environmental tracer transport (³H and SF₆) in the saturated and unsaturated zones and its use in nitrate pollution management. *J. Hydrol.* 240, 187-205.

Upstill-Goddard, R.C., Wilkins, C.S., 1995. The potential of SF₆ as a geothermal tracer. Wat. Res. 29, 1065-1068.

Dillon, K.S., Corbett, D.R., Chanton, J.P., Burnett, W.C., Furbish, D.J., 1999. The use of sulfur hexafluoride(SF₆) as a tracer of septic tank effluent in the Florida Keys. J. Hydrol. 220, 129-140.