

문경 탄산온천수의 지화학적 특성 및 침전물에 대한 광물학적 연구

김 정 진¹ · 김 윤 영²

¹서울대학교 지구환경과학부 · ²중앙대학교 산업경영연구소

Water Geochemistry and Mineralogical Characterization of Precipitate in the Munkyeong Bicarbonate Hot Spring

Jeong-Jin Kim¹ · Yoon-Young Kim²

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

²Industry Management Institute, Chung-Ang University

ABSTRACT

Water chemistry in the Munkyeong hot-spring expresses high values of EC($1,857 \mu\text{S}/\text{cm}$), HCO_3 ($1,250 \text{ mg/l}$), SO_4 (147.60 mg/l), Mg(43.05 mg/l), and Ca(279.43 mg/l). The precipitates of small quantity is formed in lower temperature, but much of in case apply heat by boiler. Although mineral that is settled from original ground water is most calcite, aragonite and calcite at the same time crystallized in boiler. The CO_3 is present predominantly as HCO_3^- and H_2CO_3 , SO_4 , Mg, and Ca are present as free ion. Ca is saturated with respect to carbonate such as aragonite and calcite but slightly undersaturated with respect to anhydrite and gypsum. Al is saturated with diasporite and gibbsite. The precipitates are composed of carbonate such as calcite and aragonite and amorphous Fe-hydroxide.

Key Words : Hot spring, Precipitates, Calcite, Aragonite, Fe-hydroxide

* Corresponding author : kjjkjj@snu.ac.kr

원고접수일 : 2002. 3.28 게재승인일 : 2002. 5.24

요약문

문경지역 온천은 칼슘-중탄산 온천으로 원수의 온도는 약 28.5°C이다. 원수는 EC(1,857 $\mu\text{S}/\text{cm}$), HCO_3^- (1,250 mg/l), SO_4^{2-} (147.60 mg/l), Mg(43.05 mg/l), 그리고 Ca(279.43 mg/l)로 상당히 높은 값을 나타낸다. 원수에는 소량의 침전물이 형성되지만 보일러로 가열할 경우 많은 양의 침전물이 형성된다. 원수에서 침전되는 광물은 대부분 방해석이지만 보일러실에는 아라고나이트와 방해석이 동시에 정출된다. 온천수 내의 화학종은 CO_3^{2-} 는 대부분 HCO_3^- 이지만 상당 부분이 H_2CO_3 로, SO_4^{2-} 는 SO_4^{2-} , Mg는 Mg^{2+} , Ca는 Ca^{2+} 로 존재한다. 전체적으로 볼 때 대부분의 성분에서 CO_3^{2-} 를 포함한 화학종이 존재하는 것을 볼 수 있다. 포화지수를 근거로 침전 가능한 광물은 다이아스포어, 보에마이트, 김사이트, 아라고나이트, 방해석, 능철석 등이지만 X-선회절 분석결과 침전물은 아라고나이트, 방해석, 철수산화물로 구성되어 있다.

주제어 : 온천, 침전물, 방해석, 아라고나이트, 철수산화물

1. 서 론

온천은 땅 표면에 자연 용출되거나 인공적으로 쟁정 시추하여 끌어올린 지하수로서 수온이 그 지역의 연평균 기온 또는 그 지역의 얕은 지층의 지하수 수온보다 높아야 한다. 그 이하의 것은 냉천. 수온과 관계없이 무기물질 또는 가스성분을 다량 함유하고 있는 것은 광천이라고 한다. 온천의 한계온도는 지역에 따라 다르며, 우리나라에서 온천은 섭씨 25°C 이상으로 규정한다. 온천수를 보통의 물과 구별할 때 온도, 밀도, 점성, 전기전도도 등과 같은 물리 화학적 성질에 의거한다. 일반적으로 보통 지하수의 온도는 그 지방의 연평균기온보다 1~4°C 높은 정도지만 그 이상 온도의 물이 지표로 나올 때는 넓은 뜻의 온천이라 할 수 있다. 우리나라에서 온천을 단순천, 단순탄산천(CO_2), 탄산수소천(HCO_3^-), 나트륨탄산수소천($\text{Na}-\text{HCO}_3^-$), 식염천(NaCl), 유산염천(SO_4^{2-}), 철천(Fe^{2+}), 명반천, 유황천(H_2S), 산성천, 방사능천(Rn , Ra) 등으로 분류한다.

국내에는 여러 곳에 탄산수 산지가 있으며, 특정 지역에 밀집하여 분포하는 경향이 있고 세계적으로도 우리나라와 유사한 탄산수 유형에 대한 생성과정과 기원에 대한 체계적인 연구가 수행되어 왔다^{1~7)}. 국내에서도 최근에는 동위 환경동위원소 추적자를 이용한 연구

가 수행된 바 있다^{8~9)}.

문경지역의 온천은 1995년 굴착된 탄산온천과 pH 9 이상인 알칼리온천수가 산출되고 있다¹⁰⁾. 탄산수의 기원에 대해서는 유화광물과 탄산염광물을 맥석으로 포함하는 광산이 존재하는 것과 결부시켜 황화광물과 탄산염광물의 용해작용으로 해석했지만^{11~12)}. 동위원소 분석결과에 의하면 지하수가 심부에서 순환하는 과정에서 심부 기원의 CO_2 기체가 공급되면서 지하수와 반응에 의해 진화된 것으로 해석하고 있다¹³⁾.

연구대상 온천수는 칼슘-중탄산천으로 단순천에 비해 칼슘과 중탄산의 농도가 아주 높은 온천이다. 국내 대부분의 온천이 단순천(80%)인데 비하여 연구 대상 온천은 칼슘-중탄산 온천으로 색깔은 황토색을 나타낸다. 온천수의 원수의 온도는 대략 30°C 내외로 타 온천과 유사하지만 보일러내의 온도는 80°C 이상으로 상당히 고온이다. 온천 원수의 온도가 낮기 때문에 원수를 보일러실에서 가열한 후 욕탕으로 보내어 일반 지하수와 혼합하여 사용하도록 되어있다.

이 연구에서는 온천원수를 보일러실에서 가열할 때 생성되는 침전물의 특성을 알아보고 침전물의 생성에 의해 나타나는 온천수의 수리-화학적 변화와 침전 광물과의 관계를 추정해 보고자 한다. 이를 위해 온천원수와 보일러실내의 온천수에 대한 화학분석을 실시하고, 보일러실 내부와 욕탕주변의 침전물에 대한 분석을 실시하였다.

2. 연구 방법

보일러와 욕탕의 바닥에 침전물을 생성시키는 가장 큰 요인은 온천수내에 포함된 성분들이다. 지하로부터 직접 퍼 올린 원수와 보일러로 가열한 온천수에 대하여 pH, 온도, 전기전도도(EC) 등을 휴대용 Orion1230 pH측정기를 이용하여 측정하였다. 분석용 시료는 현장에서 $0.45\mu\text{m}$ membrane filter를 이용해서 필터링을 했다. 시료는 1000를 멀균 처리된 polyethylene 병에 담아 보관 운반하였으며 운반한 온천수 시료는 분석을 할 때까지 4°C 로 냉장 보관하였다. 온천수의 화학적 특성을 알아보기 위하여 양이온은 유도쌍극자플라즈마분광분석(ICP-AES : Perkins-Elmer Optima 3000XL), 음이온은 이온크로마토그래피(IC : Dionex 4000i)를 이용하여 분석하였다. 분석한 시료들에 대해 MINTAQQA2 컴퓨터 프로그램¹⁷⁾을 이용하여 온천수 내에 존재 가능한 화학종을 알아보고 포화지수를 계산하여 침전가능성이 있는 광물들에 대하여 조사하였다.

실험실로 운반한 침전물은 오븐에서 50°C 에서 건조시킨 후 실험에 사용하였다. 온천의 보일러 내부와 욕탕바닥의 침전물을 구성하고 있는 광물들을 감정하기 위하여 X-선 회절분석과 쌍안실체현미경 관찰을 실시하였다. X-선회절분석은 탄소 단색광 장치가 설치된 Rigaku RAD3-C X-선회절분석기를 이용하였으며, 분석 조건은 CuK α 선을 이용하여 $0.5~2\theta/\text{min}$ (연속)로 측정하였다. 원수를 실험실에서 가열한 후 침전된 침전물에 대해서도 같은 조건으로 X-선회절 분석을 실시하였다. 침전물을 구성하는 광물들의 형태를 조사하

기 위하여 쌍안실체현미경으로 배율 20~63배정도로 관찰하여 특징적인 형태를 보이는 결정에 대해 사진촬영을 실시하였다.

3. 실험 결과

3.1 온천수의 화학적 특성

Table 1은 연구지역 온천수의 원수와 보일러 내부의 수질의 특성을 나타낸 것이다. 온천수의 원수와 보일러 내부의 성분변화가 뚜렷하게 나타나는 것은 EC, Mg, Si, Ca, Fe 등이다. EC의 경우 보일러실에서 온도를 높일 경우 크게 낮아지는 것을 볼 수 있는데 이것은 많은 양의 침전물이 보일러 내부에 생성되므로 침전된 양이 많을수록 EC값은 낮아지게 된다. Mg, Ca, Fe의 값이 크게 감소하는 것으로 보아 보일러 내부에 침전되는 물질은 주로 이 성분을 주로 하는 광물들이 침전될 것으로 예측할 수 있으며 실제로 보일러 실에서 침전되는 함 칼슘 광물로는 아라고나이트와 방해석이 있다.

원수의 온도는 약 30°C 정도로 비교적 낮으며, 침전물도 거의 생성되지 않는다. 그러나 보일러에서 고온으로 온도를 높일 경우 온천수의 화학적 특성변화로 인하여 많은 양의 침전물이 생성된다. 이 침전물들은 보일러의 가열판과 보일러실 벽에 부착되어 열효율을 급격히 저하시키게 된다. 보일러의 온도가 올라가지 않을 경우 모든 시설의 가동을 중단시키고 침전물을 제거시킨 후 다시 가동해야만 한다. 1주일 내지 10일 간격으로 한번씩 보일러 내의 침전물을 제거해야 하며 제거하는 데 소요되는 시간도 4~5시간 걸린다. 김건

Table 1. Geochemical data of water samples from Munkyeong area

Sample no.	Chemical compositions(in ppm)																
	pH	EC	alkalinity	HCO ₃	F	Cl	NO ₃	SO ₄	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Zn
H-2b*	6.21	1825	—	1233.0	1.5	16.6	ND	2.3	79.8	33.6	0.2	116.6	2.8	307.0	0.1	12.4	0.9
MK1**	6.30	2280	—	1543.7	ND	9.0	0.1	190.8	77.8	37.6	0.1	148.0	3.8	491.6	0.1	0.8	0.1
MKW1	7.13	1857	694	—	ND	13.0	ND	147.6	85.2	43.1	0.2	59.6	0.1	279.4	0.1	0.1	0.9
MKW2	7.06	1159	684	—	ND	10.1	ND	130.9	60.9	4.0	0.1	85.0	0.1	65.2	0.1	0.1	0.8

*Data from Yun et al.(1998)

**Data form Koh et al(2000)

Table 2. Distribution of selected aqueous species and saturation indices for water samples calculated using MINTEQA2 from Munkyeong area.

Sample no.		H-2b	MK1	MKW1	MKW2
Charge balance(%)		3.006E+01	5.900E+00	1.025E+01	1.440E+01
Distribution of aqueous species					
CO ₃ ²⁻	% H ₂ CO ₃ (AQ)	51.7	46.7	12.1	12.0
	% CaHCO ₃ ⁺	1.4	2.6	3.1	2.8
	% HCO ₃ ⁻	46.6	50.3	83.4	83.9
Cl ⁻	% Cl ⁻	100	100	100	100
SO ₄ ²⁻	% SO ₄ ²⁻	73.4	66.1	69.0	71.9
	% MgSO ₄ (AQ)	3.4	3.3	5.5	5.0
	% CaSO ₄ (AQ)	22.0	30.0	24.7	22.4
Na ⁺	% Na ⁺	98.6	98.6	99.1	98.7
	% NaHCO ₃ (AQ)	1.4	1.1	-	1.0
Mg ²⁺	% Mg ²⁺	81.8	82.6	87.6	83.2
	% MgHCO ₃ ⁺	17.9	13.2	7.3	11.9
	% MgSO ₄ (AQ)	-	4.2	4.8	4.3
Al ³⁺	% Al ³⁺	-	-	-	-
	% AlOH ²⁺	4.0	3.2	-	-
	% Al(OH) ₂ ⁺	10.8	26.1	1.4	1.4
	% Al(OH) ₄ ⁻	18.4	16.7	77.9	78.4
	% Al(OH) ₃ (AQ)	66.7	53.6	20.7	20.5
K ⁺	% K ⁺	100	99.6	99.6	99.6
Ca ²⁺	% Ca ²⁺	84.7	83.0	87.0	82.7
	% CaHCO ₃ ⁺	15.1	12.1	7.0	11.5
	% CaSO ₄ (AQ)	-	4.8	5.4	4.9
Fe ²⁺	% Fe ²⁺	99.9	95.1	94.3	94.6
	% FeSO ₄ (AQ)	-	4.9	5.3	5.1
Zn ²⁺	% Zn ²⁺	30.0	34.0	33.2	21.0
	% ZnSO ₄ (AQ)		2.3	2.4	1.4
	% ZnHCO ₃ ⁺	62.6	55.6	29.2	23.0
	% ZnCO ₃ (AQ)	6.7	7.2	26.6	28.8
	% Zn(CO ₃) ₂ ²⁻	-	-	8.1	16.5
Saturation indices(SI) for solid phases					
AL(OH) ₃ (BAYERITE)	-1.504	-0.011	-0.032	-0.035	
KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ (ALUNITE)	-4.210	2.825	-2.182	-2.200	
CaSO ₄ (ANHYDRITE)	-2.968	-0.888	-1.070	-1.112	
CaCO ₃ (ARAGONITE)	0.166	0.384	0.757	0.969	
Al(OH) (BOEHMITE)	0.288	1.794	1.779	1.776	
CaCO ₃ (CALCITE)	0.317	0.521	0.887	1.099	
Al(OH) (DIASPORE)	2.026	3.491	3.455	3.451	
CaMg(CO ₃) ₂ (DOLOMITE)	-0.109	0.197	1.255	1.678	
Al(OH) ₃ (GIBBSITE)	0.146	1.589	1.542	1.538	
CaSO ₄ · 2(H ₂ O) (GYPSUM)	-2.719	-0.687	-0.893	-0.936	
MgCO ₃ (MAGNESITE)	-0.924	-0.818	-0.122	0.089	
Mg(HCO ₃) (OH) · 2(H ₂ O) (NESQUEHONITE)	-3.329	-3.228	-2.534	-2.323	
FeCO ₃ (SIDERITE)	0.898	-0.271	0.207	0.442	
MnCO ₃ (RHODOCHROSIT)	-1.723	-1.566	-1.308	-1.108	
ZnCO ₃ (SMITHSONITE)	-1.374	-2.241	-0.692	-0.657	
FeO (WUSTITE)	-3.259	-3.946	-2.204	-2.221	
FeAl ₂ O ₄ (HERCYNITE)	-1.186	1.041	2.733	2.708	

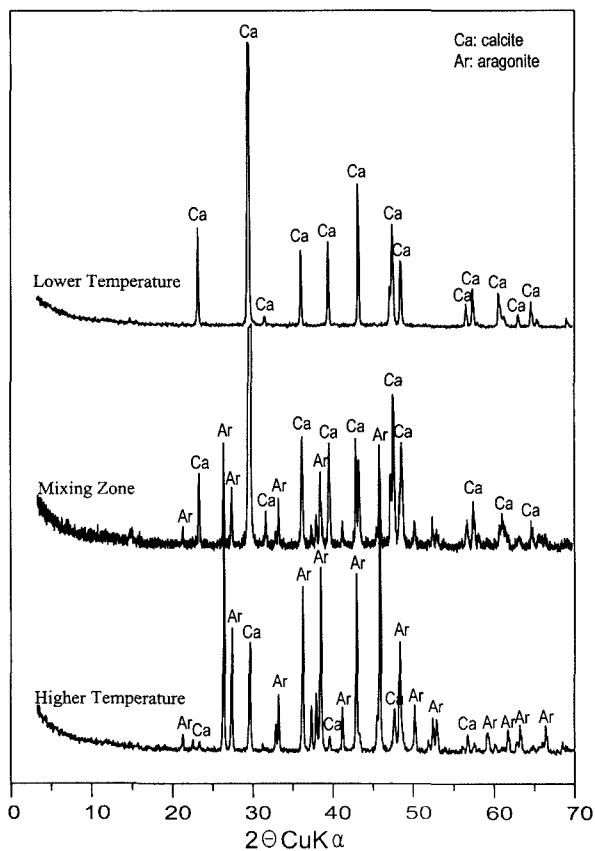
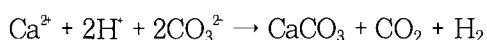


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of precipitates in the Munkyeong hot-spring.

영 등(2000)에 의한 중원지역 탄산온천지역의 탄산염 침전물에 대한 연구에서 탄산염 침전물은 오랜 기간을 거쳐 지하수가 지하심부를 거쳐 순환하면서 주변암석과 반응하여 생성된 탄산수 내에 용존되어 있던 이온들이 지표환경으로 용출되면서 탄산염 광물로 침전된 것이라고 하였다¹⁴⁾.

지표에서 CaCO_3 용해도의 주 조절 요인은 용액의 산도 (pH)인데 산도는 용액내의 CO_2 의 함량(부분압)과 관계가 있다. 자연수 중에 가장 풍부한 탄산염이온은 HCO_3^- 이며, CaCO_3 침전과 관련된 주된 반응은 다음 식으로 표시할 수 있다.



이 반응에서 CaCO_3 침전과 관련된 조절작용으로

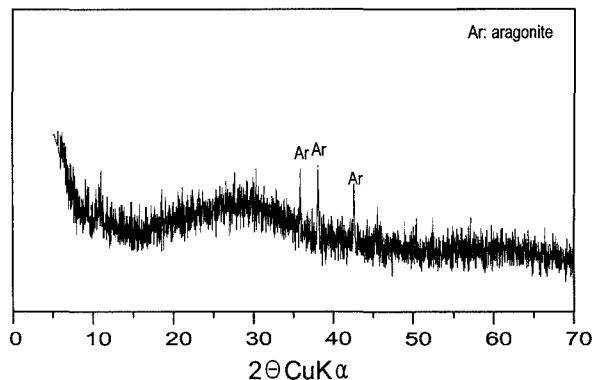


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of Fe-hydroxide in the Munkyeong hot-spring.

여러 가지를 들 수 있는데 물 속의 CO_2 가 감소하면 반응이 CaCO_3 의 침전이 일어나고 반대로 물 속의 CO_2 가 증가하면 CaCO_3 의 용해가 일어난다. 물의 온도 상승, 물의 요동, 물의 염분도의 증가, 수중식물의 광합성은 물 속의 CO_2 함량을 감소시키고 CaCO_3 의 침전을 수반하게 된다. Usdowski et al.(1979)에 의하면 상기 반응에서 핵 형성속도가 느리기 때문에 CaCO_3 가 즉시 침전되지 않는다고 했지만¹⁵⁾ 실제 보일러에서 높은 온도로 가열할 때 쉽게 CO_2 가 방출되어 아라고나이트가 침전되는 것 같다. 따라서 본 연구에서 나타나는 보일러실내부에 두껍게 침전되는 침전물도 온도상승에 의한 CO_2 감소로 인하여 CaCO_3 광물이 침전된 것으로 볼 수 있다.

CaCO_3 광물에는 아라고나이트와 방해석이 있다. 일반적으로 상온에서는 방해석은 안정하지만 아라고나이트는 불안정한 상태이다. Fouke et al.(2000)에 의하면 71~73°C의 온도에서는 침상의 아라고나이트가 침전되고 30~62°C에서 낮은 온도에서는 높은 온도에서는 아라고나이트, 낮은 온도에서는 아라고나이트와 방해석이 함께 산출된다고 했다¹⁶⁾. 따라서 수용액 중에서 아라고나이트와 방해석의 침전온도를 정확하게 나타낼 수 없으나 대략 30°C 부근일 경우 방해석이 침전되고 그 이상일 경우 아라고나이트가 침전되는 것으로 추정할 수 있다. 연구지역의 온천 원수의 온도가 30°C 부근이므로 원수에서는 주로 방해석이 침전될 가

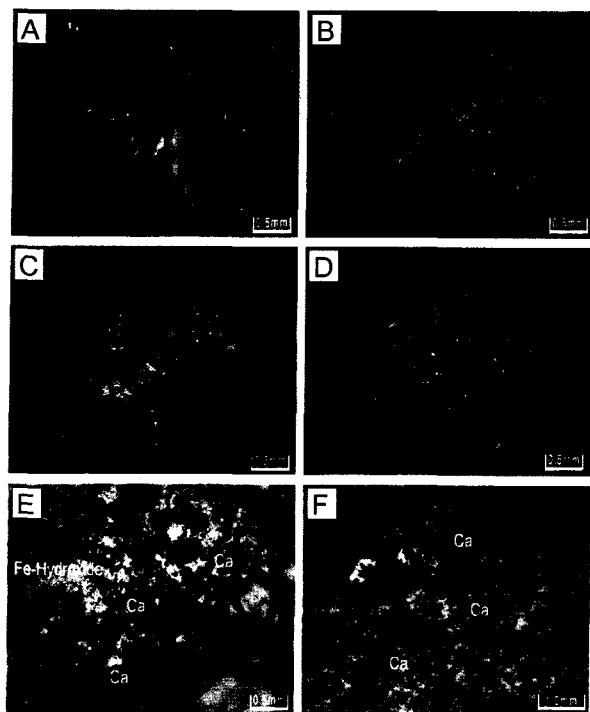


Fig. 3. Stereoscopic micrographs of precipitates in the Munkyeong hot spring.(A:mixing zone; B and C:higher temperature; D, E and F:lower temperature; Ca:calcite; Ar:aragonite)

능성이 크며 보일러실의 온도가 80~90°C이므로 아라고나이트가 침전된다. 실제로 보일러실에서 원수가 공급되는 입구에는 아라고나이트와 방해석이 함께 산출되지만 그 외에는 아라고나이트만 침전된다. 욕탕의 경우 일반지하수와 혼합하여 사용하기 때문에 온도가 낮아지기 때문에 주로 방해석이 침전된다. 또한 수용액 중에는 Mg의 함량도 고온의 보일러 내부의 온천수에서 크게 감소하는 것으로 보아 고상으로 침전되었을 가능성이 크지만 X-선회절 분석결과 이 성분과 결합된 광물을 확인 할 수 없었다. 고용권 등(2000)에 의한 심부(600 m) 온천수의 EC(2035 $\mu S/cm$), Ca(344.0 mg/l), Si(111.5 mg/l) 값보다 크게 낮은 것을 볼 수 있는 데 이것은 지하 심부에서 온천수를 지표면으로 끌어올리는 동안 이 성분들이 고상으로 온천수로부터 제거되었을 것으로 추정된다.

3.2 화학종과 포화지수

Table 2는 MINTEQA2 컴퓨터 프로그램을¹⁷ 이용하여 계산한 각 성분의 화학종과 침전 가능한 광물에 대한 포화지수(SI)를 나타낸 것이다. CO_3^- 는 MKW1과 MKW2의 경우 대부분(80% 이상) HCO_3^- 로 존재하지만 시료 지하심부 시료인 H-2, MK1은 상당히 많은 양의 $H_2CO_3(aq)$ 형태의 화학종이 존재하는 것을 알 수 있다. SO_4^{2-} 는 대부분 SO_4^{2-} 상태이며 그 외 $CaSO_4$, $MgSO_4$ 로 존재한다. Mg는 Mg^{2+} , $MgHCO_3^+$, $MgSO_4$ 의 화학종이 있지만 대부분 Mg^{2+} 형태로 온천수 내에 존재한다 (Table 2). Al은 다양한 화학종이 존재하지만 온천수내에 0.2 mg/l 이하로 아주 낮은 함량을 나타낸다. Ca는 많은 양의 침전물이 생성된 보일러 내의 시료(MKW2)를 제외한 다른 시료에서는 높은 값을 나타낸다. Ca는 80%이상이 Ca^{2+} 로 존재하며 $CaHCO_3^+$ (7.0~15.1 %), $CaSO_4(aq)$ (0~5.3 %) 정도이다. 전체적으로 볼 때 대부분의 성분에서 CO_3^- 를 포함한 화학종이 존재하는 것을 볼 수 있다.

포화지수를 근거로 침전 가능한 광물은 다이아스포어(diaspore), 보에마이트(boehmite), 길사이트(gibbsite), 아라고나이트, 방해석, 능철석 등이지만 X-선회절 분석결과 침전물은 아라고나이트와 방해석으로 구성되어 있다. 이것은 무한히 긴 반응시간이 주어진다면 방해석과 아라고나이트 이외의 광물들도 침전 가능하다는 것을 의미한다. 침전 가능한 광물은 대부분 Ca 와 Al 과 결합된 광물이지만 실제로 온천수내에 높은 함량을 나타내는 성분은 Ca , Mg , 그리고 SO_4^{2-} 이다. SO_4^{2-} 를 포함한 석고와 경석고는 거의 포화상태에 도달했으며 Mg 와 결합한 돌로마이트는 MK1, MKW1, MKW2시료에서 마그네사이트는 MKW2 시료에서 포화상태에 도달해 있다.

3.3 X-선회절분석

Figure 1은 문경온천에서 침전되는 침전물에 대한 X-선회절 분석 결과이다. 보일러 내의 고온에서 생성된 침전물에서 관찰되는 광물은 주로 아라고나이트이

며 온천원수나 욕탕 주위의 저온에서 생성된 광물은 주로 방해석이다. 보일러 내에서 원수가 유입되어 혼합되는 부분에서 생성된 침전물은 아라고나이트와 방해석의 양이 비슷하게 정출되지만 욕탕주위의 저온에서 침전된 침전물은 대부분이 방해석으로 이루어져 있다. 따라서 고온에서 정출되는 것은 주로 아라고나이트이고 저온에서 정출되는 광물은 방해석이라고 결론지을 수 있다. 보일러 내의 침전물은 색깔에 따라 2가지로 구분할 수 있다. 흰색의 광물은 주로 탄산염 광물인 방해석(calcite)과 아라고나이트(aragonite)이며, 황색을 띠고있는 물질은 아주 미세한 분말로 X-선 회절분석결과 거의 비정질에 가까운 철 수산화물로 사료된다 (Fig. 2).

3.4 쌍안실체현미경 관찰

온천에서 관찰되는 스케일은 외관상 황색을 띠고 있지만 실체현미경으로 관찰하면 무색의 침상의 결정을 황색의 작은 입자들이 피복되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 보일러실 내부에서 채취한 침전물은 침상으로 발달한 아라고나이트며, 욕탕바닥의 침전물은 아라고나이트와 방해석이 함께 관찰되지만 대부분이 방해석 결정으로 되어있다 (Fig. 3). 침상으로 발달한 아라고나이트 결정은 길이가 약 0.1~0.5 mm이며, 구형 혹은 육면체형태의 방해석은 지름 약 0.1~1 mm로 다양한 크기의 결정으로 나타난다. 방해석, 철수산화물, 아라고나이트가 층으로 나타나는 경우가 있는데 이것은 온천수에서 침전될 때 온천수의 온도변화 및 화학적 특성에 따라 서로 다른 광물이 침전된 결과이다.

4. 토의 및 결론

칼슘-중탄산천의 경우 보일러에서 원수를 가열할 경우 물의 화학적 특성변화로 많은 침전물이 생성된다. 이 침전물들은 보일러의 가열판에 침적되어 단시간에 보일러의 열효율을 급격히 감소시키기 때문에 보일러 내부에 침전물을 주기적으로 제거시켜야 한다. 침전물의 종류는 온도에 따라 다르며 30°C 이하의 저온에서 생성된 광물은 대부분 방해석이며 80°C 정도의 고온에

서 형성된 침전물은 아라고나이트와 방해석이 함께 산출된다. 그러나 보일러실 내의 온도가 고온으로 가열되어도 원수가 유입되는 부근의 온도는 낮기 때문에 이곳에서 침전되는 광물은 주로 방해석으로 침전된다. 따라서 보일러실 내부에서 방해석과 아라고나이트가 함께 산출되는 것은 원수의 유입 시 온도에 따라 침전되는 광물이 다르기 때문이다. 컴퓨터 프로그램을 이용한 화학종과 포화지수 계산에서 대부분의 성분들은 이온상태로 존재하며 침전 가능한 광물로는 다이아스포어, 보에마이트, 깁사이트, 아라고나이트, 방해석, 능철석 등이지만 실제로 침전되는 광물은 아라고나이트와 방해석 그리고 철 수산화물이다. 온천수와 침전물이 황색을 나타내는 것은 바로 이 비정질의 철 수산화물의 영향 때문이다.

4. 사사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-4-1)에 의해 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Caboi, R., Cidu, R., Franfani, L. and Zuddas, P. "Geochemistry of the high PCO₂ waters in Longudro, Sardinia, Italy", *Appl. Geochem.*, 8, p. 153-160 (1993).
2. Duchi, V., Campana, M.E., Minissale, A., Thompson, M. "Geochemistry of thermal fluids on the volcanic Isle of Pantelleria, southern Italy" *Appl. Geochem.*, 9, p. 147-160 (1994).
3. Dunchi, V., Minissale, A.A., Ortino, S. and Roman, L. "Geothermal prospecting by geochemical methods on natural gas and water discharge in the Vulsini Mts volcanic district, Central Italy", *Geothermics*, 16, p. 147-157 (1987).
4. Mayo, A.I. and Muller A.B. "Law temperature diagenetic-metamorphic and magmatic contributions of

- external CO₂ gas to a shallow groundwater system", *J. Hydrol.*, **197**, p. 286-304 (1997).
5. Pauwels, H., Fouillac, C. and Fouillac, A.M. "Chemistru and isotopes of deep geothermal saline fluids in the Upper Rhine Graben : Origin of compounds and water-rock interactions", *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**, p. 2737-2749 (1993).
6. Pauwels, H., Fouillac, C., Goff, F. and Vuataz, F.D. "The isotopic and chemical composition of CO₂-rich thermal waters in the Mont-Dore region (Massif-Central, France)", *Appl. Geochem.*, **12**, p. 417-427 (1997).
7. Stober, I. and Bucher, K. "Deep groundwater in the crystalline basement of the Black Forest Region", *Appl. Geochem.*, **14**, p. 237-254 (1999).
8. 고용권, 김천수, 배대석, 김건영, 정형재 "중원지역 탄산수의 지구화학적 진화", *자원환경지질*, **32**, p. 969-483 (1999).
9. 최현수, 고용권, 김천수, 배대석, 윤성택 "강원도 지역 탄산수의 환경동위원소적 특성". *자원환경지질*, v. 33, p. 491-504.
10. 고용권, 김천수, 배대석, 이동익 "문경지역 심부 지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구" *자원환경지질*, **33**, pp469-489 (2000).
11. Yun, S.T., Koh, Y.K., Choi, H.S., Youm, S.J. and So, C.S. "Geochemistry of geothermal waters in Korea : Environmental isotope and hydrochemical characteristics II. Joungwon and Munkyeong areas", *Econ. Environ. Geol.*, **31**, p. 201-213
12. Choi, H.S. "Hydrogeochemical and Environmental Isotopic Studies of the Carbonate-typy Groundwaters in the Jungwon and Munkyeong areas", Ms. Thesis, Korea Univ., (1998).
13. 고용권, 김천수, 배대석, 김건영, 정형재 "초정지역 탄산수의 지구화학적 연구 I. 수리화학", *지하수환경*, **6**, p. 159-170 (1999).
14. 김건영, 고용권, 최현수, 김천수, 배대석 "중원지역 탄산온천수의 탄산염 침전물에 관한 광물학적 및 지구화학적 연구", *한국광물학회지*, **13**, p. 23-36 (2000).
15. Usdowski, E., Hoefs, J. and Menschel, G. "Relationship between 13C and 18O fractionation and changes in major element composition in a recent calcite-deposition spring-A model of chemical variations with inorganic CaCO₃ precipitation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **42**, p. 267-276 (1979).
16. Fouke, B.W, Farmer, J.D, Des Marais, D.J, Pratt, L, Sturchio, N.C, Burns, P.C. and Discipulo, M.K. "Depositional facies and aqueous-solid geochemistry of travertine-depositing hot springs (Angel Terrace, Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, U.S.A.)", *Jour. Sedimentary Research*, **70**, p. 565-585 (2000).
17. Allison, J. D., Brown, D. S. and Novo-Gradac, K. J. MINTEQA2/ PRODEFA2, A geochemical assessment model for environmental systems : Version 3.0 User's Manual, USEPA Report No. EPA/600/3-91/021 : Athens. Georgia (1991).