

지열 및 온천탐사의 신기법

New Technology for Geotherm and Hot Spring Survey



秦 秀 雄*

Jin, Soo Woong

* 지하자원개발기술사, 본회 홍보위원, (주)한자엔지니어링 대표이사.

1. 서 언

요즈음 전국 어디를 가나 온천 개발 '붐' (boom)을 이루고 있다.

온천은 건강에 유익한 것이고 온천이 개발만 된다면 온천주변 땅 값도 올라 온천개발에 따른 막대한 부가 창출될 수 있다는 막연한 생각에서다.

그러나 실제 온천을 개발함으로써 지역적으로 얻어지는 소득도 있지만 잃는 것이 더 많다는 사실을 모르기 때문이다.

천연 '에너지' 자원 중 지열자원이 차지하는 비중도 그리 만만한 것은 아니지만 자연 용출이 안 되는 지하심부 온천을 개발함으로써 지하수 오염 등 환경과괴란 달갑지 않은 제약도 한 번쯤 생각해 봐야 한다.

그간 지열과 온천탐사 기법은 발전을 거듭해 1,000m 이하 심부까지 지구 물리탐사와 심정 시추(boring)가 가능해져 부질없는 이들에 의해 심정 시추공이 마구잡이로 착정돼 지하수를 오염시킨 사례가 허다하다.

온천개발은 정확한 지구물리 및 지화학적 탐사가 선행되고 환경영향 평가와 경제성 등을 충분히 검토한 뒤에 이루어져야 함에도 불구하고 화성암

지대의 지온증가율이 높다는 이론에 따라 1,000m 이하까지 무조건 시추공을 도달만 시키면 된다는 생각으로 심정굴착을 서슴치 않고 있다. 예로부터 개발된 유명 온천보다 새로 개발된 온천엘 가보면 우리 건강에 그리 좋지도 않은 '라돈'천이니 '겔마늄'천이니 하는 낯설은 방사능 천을 거명하고 있음을 볼 때 아연실색할 수밖에 없다.

물은 산화광물의 일종으로 물을 매체로 하여 얻어질 수 있는 지열자원 또한 물과 함께 우리 광업자원 분야 중 개발가능자원에 속한다.

그간 30년 가까이 광업자원기술사로 현업에 참여하면서 지하수와 온천탐사에서 얻어진 최신 온천탐사기법을 소개함으로써 합리적인 지열개발에 도움이 될 수 있기를 바란다.

2. 온천이란?

온천은 지열에 의해 땅속 깊은 곳에서 지하수가 데워져 그 지방 연평균 기온 이상 온도를 유지하면서 솟아 나오는 샘물을 말한다.

그러나 온천은 ① 수온, ② 용해성분, ③ 용출량의 3요소가 모두 충족되어야 된다.

첫째, 수온은 우리나라의 경우 온천 용출구의



수온이 25°C 이상 되어야 한다.

온천수는 각 나라마다 다소 차는 있어도 수온에 따라 다음과 같이 세분하고 있다.

※ 미국의 경우

수온이 78°F(25.6°C)이하이면 냉천(cold spring) 78° ~ 98°F (25.6~36.7°C) 일 때

미온천(tepid spring)

98°F (36.7°C)이상 일 때 온천 (hot spring)으로 분류한다.

※ 국제수문의학협회 (International Society of Medical Hydrology)는 수온이 20°C 이하 일 때 냉천 (cold spring)

20° ~37°C 일 때 준온천 (subthermal spring)

37° ~ 42°C 일 때 온천 (thermal spring)

42°C이상 일 때 고온천 (hyperthermal spring)

으로 분류하고 있다.

※ 일본과 우리 나라는 다같이

25°C이하 일 때 냉광천(冷鑛泉)

25°C~34°C 일 때 미온천(微溫泉)

34°C~42°C 일 때 온천(溫泉)

42°C이상일 때 고온천(高溫泉)으로 분류하고 있다.

둘째, 용해성분에 있어서는 각종 염류 용해능도에 따라 삼투압이 크게 달라지므로 사람의 세포액과 같은 수준의 삼투압을 보일 때 등장온천(等張溫泉, isotonic solution hot spring)이라 부르는데 isotonic solution은 염류의 농도가 8.8g/l-NaCl 식염수 농도에 해당된다.

따라서 물 1g 중 용존물질 총량이 8g/l 이하 일 때 저장온천(低張溫泉, hypotonic hot spring, 빙점 - 0.55°C 이상)

8~10g/l 일 때 등장온천(等張溫泉, isotonic hot spring, 빙점 - 0.55°C~-0.58°C)

10g/l 이상 일 때 고장온천(高張溫泉, hypertonic spring, 빙점 - 0.58°C 이하)으로 구

분한다.

또한 수소 '이온' 농도에 따라 강산성온천(強酸性溫泉, strong acid hot spring) : pH2

산성온천(酸性溫泉, acid hot spring) : pH2 ~4

약산성온천(弱酸性溫泉, weak acid hot spring) : pH4~6

중성온천(中性溫泉, neutral hot spring): pH6~7.5

약 '알카리' 온천(弱 '알카리' 溫泉, weak alkaline hot spring) : pH7.5~9

'알카리' 온천('알카리' 溫泉, alkaline hot spring) : pH9으로 구분하고 있다.

또한 용해성분에 따라 온천수 1kg중 '가스' 성분을 제외한 용존물질총량이 1,000mg 이하 일 때 '단순천(單純泉)'이라 하고 1,000mg 이상 일 때는 용존물질 중 주요 음 '이온'인 중탄산 '이온'(HCO₃), 염소 '이온'(Cl⁻), 유산 '이온'(SO₄²⁻) 유무에 따라 ① 중탄산염천(重碳酸鹽泉), 또는 중탄산천(重碳酸泉), ② 염화물천(鹽化物泉), ③ 유산천(硫酸泉) 또는 유산염천(硫酸鹽泉)으로 구분한다.

<표 1>은 온천을 온천수중 용존 주성분함량에 따라 대별한 것이고 세분하면 80여 종류나 된다.

셋째, 용출량은 과거에는 자연히 용출되는 수량을 기준 하였으나 현재는 동력에 의한 배수(排水) 가능량을 모두 포함하고 있다.

용출량에 대한 특별한 기준은 없으나 상업성을 유지하려면 최소한 100m³/일 이상은 되어야 된다.

이밖에 온천용출상태에 따라 인공적인 외압 없이 자연 용출되는 온천을 자분천(自噴泉, self flowing spring)이라 하는데 이때도 기포를 발생시키면서 용출되면 포비천(包沸泉, bubbling spring), 수증기가 발생되면 비등천(沸騰泉, boiling spring)이라 한다.

또한 온천수의 용출량의 변화가 심하면 이를 맥박천(脈搏泉, pulsating spring), 비교적 일정한 간격으로 증지와 용출을 반복하면 간헐천(間

〈표 1〉 온천의 종류 (대분류)

번호	종류	용존물질 총량 (mg/kg)	주 성분		부 성분		비고
			+ion	-ion	+ion	-ion	
1	단순온천 simple water spring	-1,000					+25°C CO ₂ 1,000mg/kg 미만
2	탄산탄산천 carbonated spring	-1,000					+25°C CO ₂ 1,000mg/kg 이상
3	중탄산토류천 earthy carbonated spring	+1,000	Ca ²⁺ (Mg ²⁺)	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Cl ⁻ SO ₄ ²⁻	CO ₂ ±1,000 Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ 미량
4	'소-다'천 sodium bicarbonated spring	+1,000	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺ Mg ²⁺	Cl ⁻ SO ₄ ²⁻	CO ₂ +1,000 부성분 미량 함유
5	식염천 common salt spring	+1,000	Na ⁺	Cl ⁻	Ca ²⁺ Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻ SO ₄ ²⁻	CO ₂ 1,000 이상 함유 부성분 미량 함유
6	유산염천 sulphate spring	+1,000	Ca ²⁺ Mg ²⁺ Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Cl ⁻	
7	철천 iron spring	+1,000	Fe ²⁺	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺ Mg ²⁺ Na ⁺	Cl ⁻ SO ₄ ²⁻	-1,000mg/kg vitriol spring 포함(국산)
8	명반천 alum spring	+1,000	Al ³⁺	SO ₄ ²⁻			
9	유황천 sulphur spring	±1,000			Na ⁺ Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻ Cl ⁻ HCO ₃ ⁻	S 2 이상 유리 H ₂ S, H ₂ 이상
10	산성천 acid spring	±1,000					H+1 이상
11	방사능천 radioactive spring						'라돈' 10억분의 1 '류리' 이상 '라듐' 1천만분의 1mg 이상

歇泉, geyser)이라 한다.

또한 수증기가 주로 분출되는 곳을 분기공(噴氣孔, fumarole)이라 하고 분기공중 유황, 유화수소, 아황산'가스' 등 유황성분을 주로 분출하면 유기공(硫氣孔, solfatar), 탄산'가스'가 주로 분출되면 탄산공(炭酸孔, mofete)이라 한다.

이상과 같은 온천의 종류를 먼저 숙지하는 것이 온천탐사에 기본이 된다.

3. 온천조사의 신기법

3-1. 지형의 선상구조 조사

그간 지열이나 온천탐사기법은 눈부시게 발전해 왔다. 필자가 기술사 사무소를 개설한 시기인

70년대초 만하여도 온천조사에 일반적인 지질구조와 지온등곡선(地溫等曲線)에 의한 지열탐사가 고작이었다.

현재는 'Landsat' 인공위성을 통한 특정지역 지표의 화상해석 즉 'Remote sensing' 기법의 발달로 지형의 선상구조(lineament)를 보다 정확하게 파악할 수 있게 되어 지질구조를 해석하는데 많은 도움이 되고 있다.

따라서 remote sensing 기법에 의해 작성된 지형도를 토대로 지표지질 조사를 하게되면 지형, 지층의 층리, 엽리, 편리, 절리의 주향 및 경사, 암석의 종류, 지질구조 및 변질대 등을 보다 정밀하게 조사할 수 있다.

3-2. 열수변질대 조사

조사 대상지역에 대한 과거 지열활동 상황을 우선 파악하기 위하여 열수변질대를 찾아내 시료를 채취하고 X-선 회절분석을 통하여 열수변질 광물 찾아내 과거 열수 활동상황을 추정해 내는 조사이다.

즉, 채취된 시료 분말을 X-선 회절에 의한 X-선을 쬐이면 X-선 파장이 광물조성 성분의 각 원자를 교란시켜 X-선을 서로 간섭하게 하면 특정방향으로 강한 회절 X-선을 방출하는 성질이 있어 이를 이용하여 광물의 성분을 알아내는 방법이다.

이때 회절 X-선이 모이는 위치와 강도 등을 계수관에 의해 측정, 각종 광물의 원자 배열에 의한 특유 회절 X-선 'Pattern'으로 비교, 광물의 종류를 알아낸다.

야외조사에서는 변성광물을 대표하는 ① 점토광물, ② 비석광물, ③ 규산광물, ④ 유화광물, ⑤ 결정질광물, ⑥ 철광물, ⑦ 초생광물 등의 부존 여부를 면밀히 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

이상 변성광물의 부존 여부가 X-선 회절분석 결과로 파악되면 다음과 같은 표에 기록해 열수 변질대 유무를 가름하는데 참고로 한다.



〈표 2〉 분말X-선 회절분석결과 총괄표 (예)

구분	광물명	시료채취지점별 함량
변광물	sericite	
	kaolinite	
	diaspore	
	pyrophyllite	
	hydrated halloysite	
	halloysite/ dickite	
	kaolin	
	sericite/ illite	
	sericite/ montmorillonite	
	chlorite	
성광물	saponite	
	montmorillonite	
	rock crystal	
	quartz	
광비석광물	tridymite	
	crystalobite	
	opal	
	harmotome	
	apophyllite	
	laumontite	
	analcime	
	mordante	
	stibite	
	heulandite	
기타	chabazite	
	calcite	
	talc	
	actinolite	
유화광물	epidote	
	prehnite	
	galena	
	zincblend	
철광물	marcasite	
	pyrite	
	limonite	
	magnetite	
초생광물	hematite	
	olivine	
	pyroxene	
	hornblend	
비고	mica	
	feldspar	
	quartz	
	Hg-density	
strike/ dip		
thickness		
color		

3-3. 지화학 탐사

온천 탐사에 있어 주로 시행되는 지화학 탐사는 ① 지상방사능, ② 지중방사능, ③ 토양중 수은함량, ④ 지중 수은 '가스' 농도측정 등이다.

① 지상방사능 측정

온천 탐사를 위하여 먼저 지상방사능 측정을 선행한다.

지상방사능 측정은 단층, 절리, 층리 등 틈새에 충전돼 있는 물질, 즉 단층점토나 변성광물에 방사능 물질이 농집돼 있으므로 농집부존 예상 지점을 선정하여 방사능을 측정한다.

지상 방사능 측정장치는 여러 종류가 있는데 비교적 사용이 편리한 日本 掘場製作所(株) 製 α(알파) 'Scintillation Counter' PM-100이 많이 보급돼 있다.

측정방법은 계측기를 지표에 직접 밀착시켜 측정하는데 우주선의 영향을 받기 쉬우므로 'Scintillation Counter' 에 내장되어 있는 'timer' 를 이용 30초간 최소 3회 이상 검측한다.

② 지중 방사능 측정

지중방사능측정은 수은탐사(水銀探査) 측정공을 이용하여 'Scintillation Counter' 를 측정공내에 삽입, 지상방사능 측정 방식과 같은 방법으로 측정한다.

지중 방사능 측정은 측정 'terminal' 이 측정공내 삽입되기 때문에 측정된 방사능치는 이론상 지상 방사능치의 배 이상 된다.

③ 토양수은 및 지중수은 '가스'

일반적으로 지각을 구성하는 암석에는 약 80ppb(part per billion)의 수은이 함유돼 있다.

그러나 수은은 지하 심부에 존재하는 고온성 암장(magma)이 암장분화작용(magmatic differentiation) 또는 암장분정작용(magmatic crystallization)을 통해 농집된다.

농집된 수은은 고온 고압상태의 휘발성 물질로 변해 암반중 발달한 틈새(단층, 절리 등)를 따라 상승한다.

또한 수은 '가스' 의 입자는 아주 미세하여 암석 공극 속까지 침투 상승하다 지표부근에서 냉각 잔류하거나 일부는 대기 중으로 방출돼 버린다.

이때 지표부근에 잔류된 수은을 '토양수은'(土壤水銀) 이라 하고 대기 중으로 방출된 수은을

수는 '가스' (정확하게는 땅속 50cm 내 흙중 검출되는 수)로 구분한다.

암장의 냉각 과정에서 화강암질 암장(granitic magma)이 존재하면 토양수은이나 수은 '가스' 농도는 자연적으로 높아진다.

이러한 현상을 일반적으로 지열대라 부르며 특히 온천부존 가능성이 높은 지열대에서 수은 이상 함유대가 존재하게 된다.

실제 지하에 고온성 물질이 존재한다 하더라도 수은 '가스'가 상승할 수 있는 암석의 틈새나 공극이 없으면 수은 이상대가 나타날 수 없다.

'토양수은'은 흙이 퇴적될 때부터 측정시까지의 잔존 총량이 측정값의 기준이 되는데 측정지역이 수은계 농약이나 제초제를 다량 썼던 곳이라든가 수은 제품이나 산업폐기물을 폐기하여 수은이 오염된 지역이나 측정지역 부근에서 과거 금속광산이 개발되었던 지역에서는 정확한 '토양수은' 측정이 어렵다.

'토양수은' 농도 측정은 직경50mm, 길이 500mm의 철관을 땅 속에 박았다가 빼어내 철관 끝에 묻어 나온 흙을 약 3g정도 채취하여 실험실로 옮긴 뒤 바람으로 건조시킨다.

이렇게 만든 시료는 수은측정장치를 이용 가열 분해시켜 금- '아말감' ('gold-amalgam') 포집방식이나 비분산이광속식원자흡광법(非分散二光速式原子吸光法)으로 분석 측정한다.

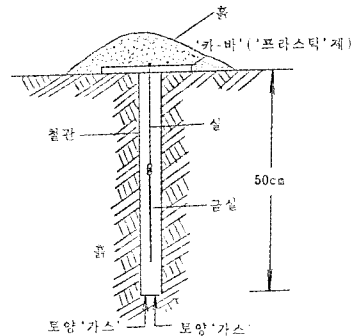
④ 지중수은 '가스' 측정

지중수은 '가스' 측정은 수은이 금과 반응하여 금- '아말감' ('Amalgam')이 되는 성질을 이용 측정한다.

즉 철관을 빼낸 측정공에다 열처리하여 수은을 완전 제거한 직경1mm, 길이 10cm, 중량 약 1.5g 순금제 금봉을 실에 달아매 구멍 속에 집어 넣어 1주일 이상 지난 뒤 회수한다.

금봉에 부착된 수은은 수은측정 전용장치를 이용, 가열 분해하여 금- '아말감' 포집방식이나 '비분산

이광속식 냉원자흡광법' 등으로 분석 측정한다.



〈그림 1〉 금봉법에 의한 땅속 수은 '가스' 측정

3-4. ELF-MT법 탐사

1) MT 탐사법의 특징

MT 탐사법은 지자기지전류법(地磁氣地電流法 'magneto tellulic method')이라 불리며 지반 비저항을 측정하여 지하구조를 추정하는 방법이다. 과거 전기탐사는 대체로 직류를 사용하는데 반하여 MT법은 시간마다 변하는 전자파를 이용하는 방식이다. 전자파 주파수에 따라 조사지역 탐사심도가 달라진다.

본 법의 특징은 파장이 큰 주파수의 전자파를 이용하여 지표로부터 지하 약2,000m 깊이 까지 탐사가 가능하다는 것이다. 종래 직류를 이용한 전기 탐사법은 고작 100m 내외 심도까지 탐사가 가능하였던 것과 비교하면 획기적인 탐사방법이다.

모든 지반은 그 나뉠대로 특정된 비저항치를 갖고 있으나 우주 자장 변동에 따라 지반내 지전류도 유도되어 영향을 받는다.

즉 유도된 지전류는 이차적인 자장을 형성한다. 이와 같이 유도된 전장(電場)과 자장(磁場)의 크기는 지반의 비저항 분포에 따라 결정된다.

여기서 어느 지점에 직교하는 자장과 전장 값을 측정하게 되면 전술한 양자(兩者)의 비(比)로 지반 내부의 비저항 값을 측정할 수 있다.

또한 지반 내부에 유도된 전자파는 그 주기가 길



면 길수록 깊게, 짧으면 얇게 탐사범위가 결정된다.

따라서 여러 주기의 전자파를 측정하여 해석함으로써 상당한 깊이까지 지반의 비저항값을 측정할 수 있다. MT 탐사법의 자연계에서 얻어질 수 있는 발신원은 주로 외계의 지자기 변화 또는 번개에 의한 방전에서 얻어진다.

이와 같이 자연계의 변동자장 'specter' 는 어느 주파수대에서 절정을 이루는 것으로 알려지고 있다.

이중 ELF-MT법에 사용되는 주파수는 일반적으로 5Hz~5KHz에 속하는 VLF 중 ELF 대를 사용하며 특히 그 중에서도 강도가 강한 '슈-만' 공진 현상에서 유래된 주파수인 $f = 7, 8, 14, 20.4, 39, 80, 250, 500\text{Hz}$ 까지 사용한다.

〈표 3〉 주파수 표시 및 범위

주 파 수 표 시	주파수범위	주파수번호
ELF (extra low frequency)	5Hz~5KHz	
VLF (very low frequency)	5~30KHz	4
LF(low frequency)	30~300KHz	5
MF(medium frequency)	300~3,000KHz	6
HF(high frequency)	3~30MHz	7
VHF (very high frequency)	30~300MHz	8
UHF (ultra high frequency)	300~3,000MHz	9
SHF (super high frequency)	3~30GHz	10
EHF (extremely high frequency)	30~300GHz	11
	300~3,000GHz, 또는 3THz 이하	12

2) ELF-MT 탐사법

ELF-MT 탐사법의 발신원은 주로 지자기 변화 또는 낙뢰 방전에서 기인된 발신원을 이용한다.

이와 같은 자연계의 변동자장의 '스펙터' ('specter')는 어느 주파수대에서 절정을 이루는 것은 전술한 바와 같다.

ELF-MT 탐사법은 측정지점의 자장강도를

측정하는 '센서' '코일' ('Senser' 'Coil')과 이에 직각 방향의 전자장 강도를 측정하는 전극을 20~30m 간격으로 설치한다. 측정은 수신기에 의해 자장과 전장의 강도를 약 1분간 측정하여 그 사이 고속 A/D '컨버터'('converter')로 약 200개 정도의 '데이터'를 '샘플링'으로 한다.

다음 2분간 자연 '노이즈' 강도를 같은 방법으로 측정한다.

A/D '컨버터'를 통하여 '샘플링'한 '데이터'로부터 접속된 '컴퓨터'로 비저항을 산출해 낸다.

일반적으로 ELF의 10~200Hz를 사용 계측한다.

《 MT 1차원 '인버-션' 》

MT 1차원 '인버-션'은 각층 높이(h)와 비저항 값 ρ를 미지수인 비선형최소자승법(非線形自乘法)에 의해 최적곡선을 구한다.

단위 : Ω · m

암 석 명	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
결 석 고									
점 토 질 암									
실 도									
원 무 암									
반 암									
현 암									
석 회 질 암									
변 마 암									
화 강 암									
취 록 암									
고 회 암									
정 질 석 회 암									
치 밀 석 회 암									
력 암									
이 회 암									
사 암									
미 고 결 사 암									
고 결 사 암									
함 유 사 암									
점 판 암									
암 염									
유 화 광 물									
무 연 탄									
역 침 탄									
갈 탄									
이 탄									

〈그림 2〉 암석의 비저항치

이때 지층의 두께와 비저항을 전산 '프로그램'을 이용 산출하여 활용한다. (공식생략)

3) 암석과 비저항의 관계

일반적인 암석의 비저항치는 <그림 2>와 같다. <그림 2>에서 보듯이 같은 암종이라도 비저항치에 있어서 10~100 배나 서로 다를 수 있다.

비저항이 적은 암석은 모래, 미고결사암, '실트' ('Silt'), 혈암 등이며 일반적으로 화성암인 현무암이나 화강암 등 풍화되지 않은 신선한 암석은 비저항치가 높아 1,000~100,000 Ωm나 된다.

<표 4> 퇴적암의 비저항치

암 종	비저항치(Ω·m)						
	0.1	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵ 10 ⁶
점 토	[Graph showing resistivity ranges for 점 토]						
연 질 혈 암	[Graph showing resistivity ranges for 연 질 혈 암]						
경 질 혈 암	[Graph showing resistivity ranges for 경 질 혈 암]						
모 래	F.W.	[Graph showing resistivity ranges for 모래 (F.W.)]					
	B.M., S.W., PET.	[Graph showing resistivity ranges for 모래 (B.M., S.W., PET.)]					
사 암	F.W.	[Graph showing resistivity ranges for 사암 (F.W.)]					
	S.W., PET.	[Graph showing resistivity ranges for 사암 (S.W., PET.)]					
다공성 석회암	F.W.	[Graph showing resistivity ranges for 다공성 석회암 (F.W.)]					
	S.W., PET.	[Graph showing resistivity ranges for 다공성 석회암 (S.W., PET.)]					
다공성 백운석	F.W.	[Graph showing resistivity ranges for 다공성 백운석 (F.W.)]					
	S.W., PET.	[Graph showing resistivity ranges for 다공성 백운석 (S.W., PET.)]					
치 밀 석 회 석	[Graph showing resistivity ranges for 치밀 석회석]						
암 염	[Graph showing resistivity ranges for 암염]						
자갈	[Graph showing resistivity ranges for 자갈]						

4. 조사결과 해석

4-1. 지형

조사지역의 계곡과 하천, 능선의 방향과 산정, 눈이나 습지의 발달상태 등을 지형도나 입체 지형도에 의해 해석하여 지각의 선상구조를 파악한다.

선상구조는 대체로 4종으로 분리하여 지형도상 표시한다.

- 1) 명확한 선상구조 : 굵은 선으로 표시
- 2) 다소 명확치 못한 선상구조 : 가는 선으로 표시
- 3) 불분명한 선상구조 : 긴 점선으로 표시

4) 예상만 되는 선상구조 : 점선으로 표시
이상의 선상구조를 지형도에 작도함으로써 조사지역의 그간 지질변동 상황을 대체로 파악할 수 있다.

4-2. 지질도 작성

조사지역의 정밀 지질도 작성은 필수적이다. 지질의 층서, 화성암 분포, 암맥, 광맥 등의 관입 상황, 단층, 습곡, 충적층, 단애성 퇴적물, 층리, 절리, 유리(流理), 조암상태 등을 상세히 기록하여 지질도를 작성한다.

4-3. 지질구조

단층과 단층파쇄대의 규모, 절리, 층리, 습곡 등의 방향과 규모, 각종 암맥류의 관입 상황 등을 파악, 지층의 단면도를 작성한다.

4-4. 변질대

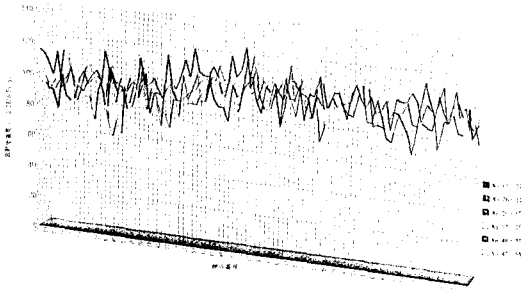
지질도와 지질단면 구조도를 작성하여 보면 지열활동으로 인한 변질대의 윤곽을 찾아 낼 수 있다. 특히 지화학탐사에 의해 열수광물의 분포 상황 파악이 가능하며 열수활동시기 등도 알아 낼 수 있다.

4-5. 지화학 탐사

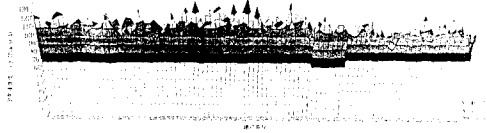
지상방사능 조사 결과에 따라 '컴퓨터'로 3차원 표시도를 다각적으로 작성하여 볼 수 있다.

3차원 표시도를 통하여 '방사능 강도 등고선도'가 작성된다.

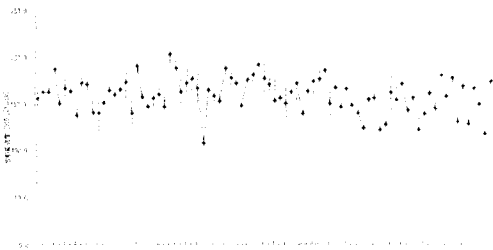
다음 그림은 국내 R-온천지역의 지상과 지중 방사능 측정 결과를 '컴퓨터 그래픽'으로 작도해 본 그림이다.



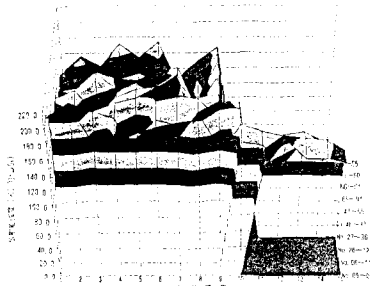
<그림 3> R-지역 지상방사능 강도 측정 결과



〈그림 4〉 R-지역 지상방사능 강도



〈그림 5〉 R-지역 지중방사능 강도



〈그림 6〉 R-지역 지중방사능 강도

다음으로 토양수는 및 지중수는 '가스' 탐사결과를 평면도에 작도하여 지하화탐사도를 작성한다.

토양수의 최대치, 최소치, 평균치를 구하여 보면 그 지역의 지열증후 유무를 판단할 수 있다. 즉 최소치와 최대치의 차가 클수록 지열 증후가 높다.

4-6. MT 탐사결과 해석

먼저 VLF-MT 법을 적용, 조사지역을 등평행선 방식으로 측선을 설정하고 측선마다 등간격으로 측정점을 정하여 측정점의 비저항치($\Omega \cdot m$)를 측정한다.

이때 주파수는 10kHz 내외가 바람직하다.

측정결과 비저항치가 주기적으로 변하는 지역과 변하지 않는 지역이 구분되는데 주기적으로 변하는 지역의 비저항치 변동 원인을 찾아내는

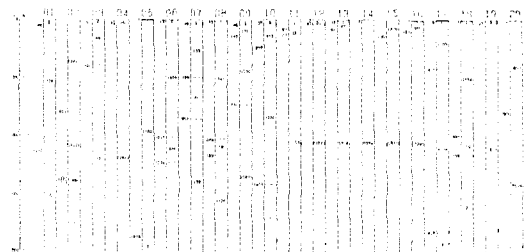
것이 중요하다.

각 측정마다 -10, 10~100, 100~500, 500~5,000, +5,000, $\Omega \cdot m$ 비저항 검측치를 색으로 구분 표시하여 비저항도를 작성하고 이어 ELF-MT법을 적용, 조사지역의 지하 심부 구조를 작도한다.

지하 심부의 수원을 조사하는 경우 단층이나 대규모 암석의 불연속면이나 틈새에 물이 차 있는 경우 비저항치는 주위 암석에 비해 아주 낮게 나타난다.



〈그림 7〉 R-지구 ELF-MT 탐사 위치 평면도



〈그림 8〉 R-지구 ELF-MT 탐사 비저항 주상도

지표부근에서 비저항치가 $10 \Omega \cdot m$ 이하로 흔히 낮게 나타나는 현상이 있는데 이는 표층수 때문인 것으로 생각해도 좋다.

그러나 충적층 하부에 발달한 신선한 원암대에서는 1,000~10,000 $\Omega \cdot m$ 이상 되는 비저항치를 보이는 경우가 있는데 이는 지하에 화강암과 같은 굳고 절리가 발달되지 않는 암석이 부존 된다는 증거가 된다.

주변에 고압선이 지나는 경우 비저항치 이상이 발생할 수 있으므로 주의를 요한다.

R온천 조사지의 비저항 탐사 위치도와 비저항 주상도의 실례를 들면 측정 0, 3, 7, 9, 10, 11에서는 지표로부터 100~500m 지하에서 87~298 Ω·m의 낮은 비저항치가 검출되는 것은 풍화대나 함유단층이 존재하는 것을 뜻하는 것이고, 측정 1, 2, 3, 5, 6, 10, 17, 18, 지하 1,000m 이상 심부에서 10 Ω·m의 저비저항치가 검출된 것은 물을 함유한 대수대가 존재할 가능성을 추측할 수 있다. (비저항 단면별 비저항 주상도 해석 생략)

5. 결론

최근 온천조사에 채택되고 있는 지열에 의한 온천조사는 다음과 같은 탐사 순서에 의한다.

- 1) 지형을 항공사진이나 'Landsat' 인공위성의 영상을 판독하여 선상구조(Lineament)를 파악한다.
- 2) 정밀 지질도 작성
- 3) 지질구조 파악
- 4) 열수변질대 탐사
- 5) 지상방사능 측정
- 6) 지중방사능 측정
- 7) 토양수온 측정
- 8) 지중수온 '가스' 측정
- 9) VLF-MT 법 탐사 시행
- 10) ELF-MT 법 탐사 시행

이상과 같은 조사과정을 통하여 얻어진 자료를 종합하여 ①지하수, ②지열, ③저수구조(대수층) 유무를 조사한다.

지열은 지화학탐사중 지상방사능과 지중방사능 강도가 높고 토양수온과 지중수온 '가스' 농도가 높은 정도에 따라 지열 부존 징후를 파악할 수 있다.

또한 지하심부에서 수 Ω·m~수10 Ω·m로 비

저항치가 지극히 낮게 검출될 때 풍부한 수량을 함유하는 대수층을 기대할 수 있다.

참고로 그간 국내 지열부존가능 지역의 수온농도 조사결과 지역별 수온농도는 <표 5>와 같이 조사되고 있다.

지면상 보다 상세한 설명을 하지 못한 채 글을 줄인다.

<표 5> 지역별 수온농도 일람표

지역명	토양수온농도 (ppb)		수온 '가스' 농도 (ng/7days)			지질
	평균치	최대최소	평균치	최대	최소	
강원도 화천군	30.2 ± 22.1	115 5	0.90 ± 0.60	3.2	0.3	화강암류, 편마암류
강원도 춘천시	18.4 ± 21.1	96 4	3.49 ± 5.86	34.2	0.3	화강암류, 편마암류, 암맥
강능시 연곡면	45.8 ± 101.6	583 5	4.28 ± 7.65	25.2	0.6	화강암류, 관입암류
강능시 명주군	10.4 ± 7.5	55 3	0.30 ± 0.12	0.8	0.1	화강암류, 관입암류
경기도 안성군	15.6 ± 8.2	55 5	0.77 ± 1.01	3.5	0.2	편마암류, 화강암류, 암맥
경기도 포천군	19.8 ± 9.3	51 6	2.59 ± 1.92	8.3	0.6	화강암류, 암맥
충북 청원군	10.0 ± 2.9	15 6	0.33 ± 0.15	0.6	0.1	편암, 암맥
충북 증원군	74.4 ± 297.9	1995 6	1.79 ± 1.67	6.7	0.4	편마암류, 화강암류, 암맥
충북 제천시	24.7 ± 21.8	160 3	0.85 ± 1.45	5.8	0.2	퇴적암류, 화강암류
충북 제천시	49.5 ± 30.2	173 16	6.53 ± 7.00	48.7	1.1	편암, 암맥
전북 무주군	80.9 ± 39.0	163 9	2.15 ± 1.11	5.0	0.6	편마암류, 관입암류, 퇴적암류
전남 승주군	43.8 ± 26.8	180 11	0.92 ± 1.07	8.4	0.2	화산암류, 암맥
전남 무안군	44.4 ± 65.2	457 1	2.20 ± 1.70	10.6	0.4	화강암류, 암맥
경남 고성군	24.9 ± 20.5	140 1	2.20 ± 1.60	9.5	0.5	퇴적암류, 암맥
제주도 제주시			3.46 ± 1.61	8.4	1.6	현무암류
제주도 제주시	107.5 ± 137.0	750 9	1.94 ± 1.82	10.7	0.2	현무암류
제주도 북제주군			0.34 ± 0.27	1.4	0.1	현무암류
제주도 북제주군	28.2 ± 33.0	182 2	2.11 ± 1.52	6.7	0.1	현무암류
제주도 북제주군	51.5 ± 25.8	164 5	1.49 ± 1.03	6.4	0.4	현무암류
남북한 전지역 평균	40.0 ± 51.2	1995 1	2.03 ± 2.08	48.7	0.1	
남한지역 평균	35.2 ± 48.2	1995 1	2.09 ± 2.37	48.7	0.1	일본통상성 자료 참조
제주도 평균	62.4 ± 65.3	750 2	1.87 ± 1.25	10.7	0.1	

(원고 접수일 1999. 5. 6)