

지방상수도의 신규 수원과 재생에너지원으로서 고산출성 대수층의 활용

한 정 상*

H.S. Engineering

The Practical Use of the Productive Aquifer Systems as a Source of a Renewable Thermal Energy and Local Water Works

Jeongsang Hahn*

H.S. Engineering

ABSTRACT

The Quaternary volcanic rocks, clastic sedimentary rocks of Kyongsang System, and carbonate rocks of Joseon and Pyongan System are known as good productive and potential aquifer systems in South Korea. National Groundwater Information Management and Service System (GIMS) indicates that the exploitable, sustainable, and current use of groundwater are about 18.8, 12.9, and 3.73 billion m³/a, respectively. The rest amount (9.1 billion m³/a) can still be used for an additional water supply source. Therefore, comprehensive groundwater survey work comprising hydrogeological mapping, subsurface investigation and quantitative aquifer test etc. are highly required to establish rational groundwater management strategy.

Key words : Fissure pore water, Potential aquifer system, Septentrional Sahara aquifer system, GIMS (National groundwater information management and service system)

1. 서 언

우리나라는 연중 65%가 비풍수기로서 이 시기의 하천수는 풍수기에 내린 비가 땅속으로 스며든 후 지하수로 변했다가 다시 하천으로 유출되어 흐르는 지하수에 기원을 두고 있음을 감안하면 국내 지표수 자원과 지하수 자원은 서로 분리해서 다룰 수 없는 물자원이다.

우리나라의 각종 암석내에 부존된 총 지하수량은 12년간의 강수량에 해당하는 량으로서, 이 중 매년 안전하게 개발 이용할 수 있는 최적 지하수 개발 가능량은 약 129억 m³ 규모로 추산된다(MLTM, 2012). 현재 국내에서 연간 사용하는 전체 물이용량 가운데 지하수 이용량은 약 11%에 해당하는 38억 m³이다. 그러나 지하수법이 제정된 지 25년이 지난 현재까지도 상술한 추가 지하수 개발 가능량(91억 m³/a)이 어디에, 어떻게, 얼마나 저장 및 산출되는지 규명되어 있지 않아 지하수 개발 가능지역에 대한

기본적인 정보마저 준비되지 않은 상태이다. 그 원인중 하나는 국가 물관련 예산 배분에서 그 사유를 유추할 수 있다. 일례로 우리나라의 연간 물관련 예산중 치수, 재해 대책, 광역 상수도 및 지표수 개발(댐건설 및 관리)등 지표수 관리에 사용하는 물관련 예산은 전체 물관련 예산의 98% 이상을 차지하는데 반해 지하수 관리에 투자한 예산은 고작 1~2% 미만이 었다. 바꾸어 말하면 물관련 국가 예산이 물이용량에 비해 지극히 형편성에 어긋나는 비합리적인 배분이 었음을 잘 보여 주는 예라 할 수 있다. 따라서 추후 지하수 관련예산은 최소 현 국내 물 이용에 해당하는 만큼 물관련 예산을 증액 배정해야 할 것이다. 또한 2012년도 국토교통부의 지하수 추진계획서에 의하면 “국내 지하수는 미래의 최후 청정수자원으로 지속가능한 보전관리를 원칙로 하되 타 대책의 여건이 불가피하거나 적극적인 개발이 필요한 지역은 이를 이용 촉진한다”로 규정하고 있어 지하수자원의 개발 이용보다는 지표수

*Corresponding author : jshahn@jejunu.ac.kr

Received : 2018. 6. 14 Reviewed : 2018. 6. 26 Accepted : 2018. 7. 31

Discussion until : 2018. 10. 31

개발에만 치중하겠다는 의도를 잘 나타내고 있다. 지역별로 지하수의 부존과 산출특성이나 지속가능한 개발 가능량에 대한 정보가 전무한 상태에서 어떻게 미래의 최후 청정 수자원인 지하수자원을 보전관리를 하겠다는 것인지 묻지 않을 수 없다.

1970년초만 하더라도 제주도는 우리나라에서 가장 만성적인 물부족 현상을 겪었던 지역이다. 그런데 제주도는 현재 국내에서 가장 성공적으로 도내 용수의 거의 100%를 지하수로 공급하고 있으며 일반적인 가뭄에도 물걱정을 거의 하지 않아도 되는 국내 유일한 대표적인 물 이용지역이다. 제주도가 이렇게 된 이유는 1970년대부터 현재까지 체계적인 지하수 조사와 평가를 꾸준히 시행해온 결과로서 특히 지하수관리 특별회계를 설치하여 지하수 이용으로 거둬들인 수익금은 모두 제주도 지하수자원의 기초 조사와 지하수사업에만 사용토록 규정했기 때문이다. 제주도의 면적은 약 1,850 km²이고 제4기 화산암의 두께는 2,000여 m로 알려져 있으나 제주도에 분포된 화산암 전체가 대수층 역할을 하는 것이 아니라, 그중 용암조각과 자갈이 용암류사이에 협재되어 있는 5-10매 정도의 화산쇄설층(crinker)과 단열들이 주대수층 역할을 하며, 지하수 함양량은 총강수량의 46.1% 정도이고 적정 지하수 개발 가능량은 현 도내 용수 이용량의 약 4배에 달하는 1일 약 178만 m³이다(JSSGP, 2003).

본고는 국내 신규 유망 고산출 암반 대수층의 수리지질 특성과 현황 및 지하수온도의 분포와 계절별 변동 특성에 관한 기존의 연구 자료들을 분석 검토하여 국지적인 물공급 문제가 발생하는 인구 밀집지역의 상수원수를 위시한 대체 및 보조 용수원으로 공급 가능성과 재생에너지원으로서 활용성 등을 제시하려는데 있다.

2. 국내 주요 수문 단위별 신규 유망 암반 대수층의 지하수 산출특성

한반도에는 제주도의 지하수 산출특성에 버금가는 주로 쇄설성 및 규산염 퇴적암으로 구성된 유망 암반 대수층들이 여러 지역에 광범위 하게 분포되어 있다. 그간 Hahn (1985)과 MLTM(2013)가 분류한 국내 암반 대수층의 수문지질 단위, 지하수의 분류, 수문지질 단위별 주요 구성 암종 및 암상을 간략하게 도표화하면 Table 1과 같다. 이에 의하면 국내에 발달된 주요 수문단위별 암반 지하수는 크게 탄산염암의 카르스트 공동단열수, 쇄설성 퇴적암류의 공극단열수, 제3 및 4기의 화산암류의 공극단열수/단열수 그리고 결정질암의 단열수로 대별할 수 있다(Hahn

and Hahn, 2015). 이들 대표적인 암종의 암반지하수의 산출상태를 요약하면 다음과 같다

2.1. 탄산염암과 카르스트 공동단열수

고생대의 Cabro-Ordovician의 조선계 대석회암층군과 선캄브리아기의 변성석회암 등은 탄산염 암종으로서 이들 탄산염암으로 이루어진 대수층내에 발달된 용식공동이나 단열내에서 산출되는 지하수를 카르스트-공동단열수라 한다. 남한에 분포된 탄산염암의 총 분포면적은 제주도의 2.3배에 해당하는 약 4,220 km²이다. 탄산염암은 강원도 정선, 영월, 평창에 발달된 고지향사대(Paleo geosyncline zone)와 옥천지향사내에 널리 분포되어 있으며 이 부류에 속하는 대표적인 탄산염 관련암들은 다음과 같다.

2.1.1. 대석회암층군

1) 두위봉형

조선 누층군의 대석회암 누층군 가운데 남한에 주로 분포된 두위봉형은 하부로 부터 상동층군과 삼척층군으로 구분되며, 삼척층군은 대기층, 세송세일 및 화질층으로, 상동층군은 두무골 세일, 막골 석회암, 직운산 세일 및 두위봉 석회암으로 구성되어 있다. 대석회암층군은 대부분이 탄산염암이나 석회암 사이에 세일, 이암, 사암 및 규암들이 협재되어 있으며 이들 비 탄산염암들은 대석회암층군을 세분하는 기준층들이다.

2) 영월형과 충주층군

마차리층, 홍월리층, 삼태산층 및 영흥층으로 구성된 영월형과 옥천고지향사에 분포된 충주층군 중 일부는 탄산염암으로 구성되어 있다. 상술한 두위봉형과 영월형 탄산염암은 심한 습곡작용과 단층작용을 받아 2차공극형의 단열이 잘 발달되어 있고 두께는 1,230~1,900 m이다.

2.1.2. 평안누층군

중생대 석탄기와 페름기에 속하는 평안누층군 가운데 고목층군(홍점통)과 철암층군하부의 일부(사동통)는 탄산염암인 석회암을 협재하고 있어 수문지질 단위는 탄산염암으로 분류하였다. 고목층군은 장성탄전 부근에서 원마도가 양호한 규암과 석회암력을 함유한 기저역암(두께는 15~20 m)의 형태로 대석회암 누층군을 부정합으로 피복하고 있으며 만항층과 금천층으로 이루어져 있다. 만항층은 주로 녹색 및 저색의 세일과 담녹색 및 잡색의 사암으로 구성되어 있고 1~4매의 석회암을 협재하고 있다. 석탄기의 Moscovian에 속하는 금천층은 세립질의 암회색 사암

Table 1. Groundwater classification and hydrogeologic units of South Korea

Groundwater classification and hydrogeologic units			Geological age and rock formation	Lithology
Classification	Hahn (1985)	MLTM (2013)		
1) Quaternary unconsolidated rock-pore water	Quaternary alluvial aquifer	Unconsolidated bed (A)	<ul style="list-style-type: none"> • Quaternary/alluvium-colluvium • Saprolite of crystalline rock 	Clay silt sand, sandy gravel. Weathered zone of crystalline bed rock,
2) Clastic sedimentary rock-fissure pore water	Clastic sedimentary rock	(C) Semi-consolidated sediments Clastic sedimentary rock (F)	<ul style="list-style-type: none"> • Tertiary/Bupyong, YeonIl, Ewol Jangki Group. • Cretaceous/Kyongsang System • Triassic-Jurrassic/Daedong System (Nampo, Bansong,Dansan Group), • Traiassic-Cabornic/Pyongan System (Cheolam,Hwangji Group) • Cambro/Joseon System (Yangduk Group) 	Semi-consolidated terrestrial and marine sedimentary rock (inter-layered w/ volcanic bed), Terrestrial clastic sedimentary rocks Shallow marine clastic sedimentary rocks (intercalated w/Ls) Shale, mudstone, sandstone, quartzite, marl, conglomerate
3) Carbonate rock-karst & fissure water	Carbonate rock-limestone	Carbonate rock limestone (G)	<ul style="list-style-type: none"> • Cretaceous carbonate beds of Hongjeom and Sadong series/Pyonan System. • Cambro-Ordovician the Great limestone series of Joseon System. • Janggun limy bed of Wonnam Group/ Archeozoic Era 	Marine carbonates intercalated clastic sedimentary rock, limestone, dolomite, marbles etc.
4) Volcanic rock-fissure pore water	Extrusive volcanic rocks Non-porous volcanic rock	Porous volcanic rock (B) Non-porous volcanic rock (D)	<ul style="list-style-type: none"> • Tertiary extrusive volcanic rocks (Jeju island, Ulnung and Chugarung graven) • Tertlary volcanic rocks, • Cretaceous Yoocheon Group, Nungju Group 	Basalt, trachybasalt, tuff, trachy andesite, scoria, trachyte etc. Rhyolites, andesites, welded tuffs, mafic volcanic rocks,tuffs, agglomerates
5) Intrusive igneous rock-fissure water	Crystalline granites	Intrusive igneous rock (E)	<ul style="list-style-type: none"> • Tertiary to Cretaceous Bulkuksa granites and dykes. • Jurrassic Daebo granites. • Triassic intrusive igneous rocks • Mesozoic intermediate to mafic plutonic rocks. • PreCambrian diorites and gabbros. syenites • Age unkown amphybolites. 	Massive and biotite granites, syenites, aplites, dykes, diorites, gabbros amphybolites
6) Metamorphic rock-fissure pore water or fissure water	Meta-sediments with thin quartzite & limestone bed Crystalline metamorphic rock	Metamorphic rock (H)	<ul style="list-style-type: none"> • Age unknown/Okcheon & meta-sediment Group, • Archeozoic/Kyongki metamorphic complex (Bucheon & Sihung Group), Yongnam system (Pyonghae Group, Janggun limestone of Wonnam Group) • Proterozoic/Chuncheon syst, (Jangrak & part of Ulli Group) • Archeozoic/Kyongki metamorphic complex (Seosan & Sihung Group), Yongnam Group (Gisung), • Proterozoic/Jirisan gneiss complex, Chuncheon Group (Chunseong), Yeoncheon, Ulli, a part of Wonnam formation, • PreCambrian/schist, gneiss, granites.. 	Slate, phillite, quartzite, fine grained schists intercalated with thin bed of limy layer and quartzite 1) Geissic rock w/ limy bed 2) Biotite,banded, augen & migmatitic gneiss 3) Granitic, leucocratic & porphyloblastic gneisses

과 3~4개의 암회색 석회암으로 구성되어 있으며 두께는 70 m 정도이다.

태백산 일대의 탄산염암 분포지역에는 용식 작용으로 형성된 많은 수의 doline, ponors, sinkhole과 karrens등

이 발달되어 있어 최근까지도 침식과 용식작용이 활발히 진행되고 있는 전형적인 Karst지형이다. 이들 탄산염암의 수리지질학적인 특성은 층리, 절리, 단층 및 습곡축을 따라 발달된 용식면과 용식공동들은 매우 투수성이 양호한 지하수의 저장소와 유동 통로의 역할을 한다. 그러나 괴상의 암체부분은 관입화성암 처럼 난대수층을 이루는 특징을 나타내고 있다. 탄산염암의 암색은 주로 백색~암회색을 띠고 대체로 괴상의 결정질이지만 전술한 용식면과 용해공동, ponor, sinkhole과 판상 또는 불규칙한 형태의 용식 공동들이 절리나 층리 및 지질 구조대를 따라 발달되어 있으며 특히 sinkhole은 북-북서향의 지질 구조대를 따라 분포한다. 단양에서 북서방향으로 약 10 km 상거한 EL.100~150 m 지역에 분포된 홍월리층과 삼태산층에는 폭이 50~300 m 정도이며 심도가 10~20 m 정도되는 sinkhole이 집중적으로 분포되어 있다.

하천바닥이 석회암으로 이루어진 대다수 곡간하천들은 상류에서 흐르던 하천이 중류에서는 하천바닥에 발달된 대소규모 용식면이나 용식공동을 통해 지하로 잠류하여 건천으로 바뀌고, 그 지점에서 수 km 하류에서 다시 용천의 형태로 용출되어 하천수를 이룬다.

신 및 고지향사대의 탄산염암 분포지역에는 많은 수의 용천들이 발달되어 있는데 자연용출량이 10,000 m³/d 이상인 용천이 19개소, 50,000 m³/d 이상인 것이 8개소, 1개소는 약 260,000 m³/d이다(Table 2). 정선지역은 풍춘석

회암과 막골석회암 분포지역에 용천들이 주로 분포하며 용출량은 11,000~80,000 m³/d 규모이다. 평창의 삼태산층으로 부터 용출되는 카르스트 공동단열수는 1966년대부터 승어양어장의 양식용수로 이용되고 있는데 이 용천은 계곡과 평행하게 발달된 단층대의 단열과 용식공동을 따라 용출되며 1966년도에 측정된 자연 용출량은 90,000 m³/d이고 수온은 10~14°C였다. 주로 탄산염암류로 구성된 퇴적암에 설치된 33개공의 심정자료를 분석한 결과는 Table 3과 같다. 즉 심정의 평균 비양수량(specific capacity, SPC)은 142 m²/d이며, 굴착심도는 20~150 m이고 심정 1개공당 지하수의 산출량은 10~2,000 m³/d로서 산출범위가 상당히 넓은데 이는 전술한 바와 같이 탄산염암의 수리적인 불균질성 때문이다.

강원도 동해시의 전천유역에 설치한 3개공의 지분정 자료에 의하면 지표하 5 m 구간은 사력으로 구성된 충적층과 그 하부 22 m까지는 제4기의 해성점토 그리고 지표하 22~42 m 구간은 제3기의 저투수성 이암이 분포하며 그 하부는 풍춘석회암(일명 대기석회암)이 분포하고 있다. 이들 3개 지층 사이의 관계는 부정합적이다. 상술한 제4기의 점토질 해성층과 제3기의 이암층은 이 지역에서 압층의 역할을 하기 때문에 풍춘석회암은 피압대수층이다. 당초에 풍춘 석회암을 약 80여 m 이상 굴착하려고 계획했으나 굴진 시 풍춘석회암에 발달된 소규모 용식공동들과 단열대에서 심한 붕괴현상과 피압지하수의 영향으로 석회

Table 2. Status of Limestone springs with discharge rate over 10,000 m³/d (The Great Limestone Series of Chosun System in South Korea)

Location	Discharge (m ³ /d)	Name of formation	Temp. (°C)
Jeongsongun Nammyon Wonpyongri	11,520	Makgol Ls	8.0
Jeongsongun Donmyon Jikjeonri	14,800	"	7.5
Samcheokgun Hajangmyon Eorigari	15,480	Pungchon Ls	9.0
Samcheokgun Hajangmyon Hansori	59,900	"	8.0
Jeongsongun Immgaemyon Yongmuri	79,200	"	8.0
Samcheokgun Hajangmyon Hasanmiri	10,940		10.0
Samcheokgun Hajangmyon Kwangdongri	43,200		9.5
Samcheokgun Jangsungmyon Hwangji	12,440~30,240	Makgol Ls	11.0
Samcheokgun Jangsungmyon Yongsuri	60,700	"	9.0
Samcheokgun Jangsungmyon Kumjaebong	52,700	"	10.0
Samcheokgun Jangsungmyon Wondongri-1	28,800	"	9.5
Samcheokgun Jangsungmyon Wondongri-2	18,720	"	9.5
Pyongchanggun-1 (Trout Hachery)	98,800	Samtaesan Ls	10~14
Pyongchanggun Mytanmyon Inganri	134,520	"	10.0
Yongwolgun Bukmyon Guamri	259,200	"	13.0
Pyongchanggun Jinbumyon Illakwonri	76,320	Jeongseon Ls	5.0
Jeongsongun Bumyon Yoyang	12,970	"	12.0

Table 3. Well numbers, well depth, pumping rate and specific capacity of water wells installed in each hydrogeologic unit of South Korea

Hydrogeologic unit	No. of well	Well depth (m)		Pumping rate (m ³ /d/well)		Specific capacity (m ² /d)	
		Range	Mean	Range	Mean		
Unconsolidated rock - pore water	2,786	-	-	30~800	629	-	
Clastic sedimentary rock - fissure pore water	294	20~224	135	10~3,500	683	0.1-250	
Carbonate rock - karst & fissure water	33	22~150	82	10~2,000	490	142	
Igneous rock	Porous volcanic rock - fissure pore water	178	26~300	98	300~4,121	1,621	1,333
	Non-porous volcanic rock - fissure pore water	132	2~1,231	95	50~2,000	417	14.9
Massive igneous rock - fissure water	458	35~300	101	1~1,300	277	-	
Metamo-rphic rock	Meta sediments - fissure pore water	87	21~250	91	10~1,930	460	15.6
	Metamorphic rock - fissure water	448	21.5~200	98	2~1,200	192	8.6

Table 4. Hydraulic properties of Pungchon limestone aquifer in Jeonchon basin (Hahn, 1983)

Well no.	Dia. (mm)	Depth (m)	SWL (bgl-m)	Flowing rate (m ³ /d)	Yield (m ³ /d)	T (m ² /d)	Storativity	Specific capacity (m ² /d)
W-1	250	51	+0.15	980	2,000	2,001	3.04 × 10 ⁻⁴	789
W-2	250	54.5	+0.09	1,000	1,500	1,423	2.46 × 10 ⁻⁴	890

암구간은 단지 7~9 m만 굴진하였다. 풍춘석회암 대수층에서 실시한 장기 대수성시험 결과는 Table 4와 같다.

전천유역일대에 분포된 풍춘석회암에 설치한 자분정 (flowing well)에서 용출되는 자분량은 1개공당 평균 1,000 m³/d 정도이며 자분고는 9~15 cm이다. 2개공에서 장기 대수성시험을 실시하여 산정한 풍춘석회암의 투수량 계수는 1,423~2,001 m²/d이며 저유계수는 2.46 × 10⁻⁴~3.04 × 10⁻⁴이고, 우물의 평균 비양수량은 840 m²/d이다. 상기 우물은 부분 관통정이므로 부분관통에 대한 보정을 실시하면 채수가능량과 비양수량은 3배 이상 증가할 것이다.

2.2. 쇄설성 퇴적암류와 공극단열수

남한에 분포된 대표적인 쇄설성 퇴적암류 가운데 고생대 석탄기~트라이아스기의 평안누층군, 중생대 쥐라기의 대동층군과 백악기의 경상누층군 등으로서 이들 암종은 1차 유효공극과 단열내에 공극 및 단열형 지하수(공극 단열수)를 저유하고 있다.

2.2.1. 고생대 석탄기~트라이아스기의 평안누층군 :

이 층군은 강릉, 삼척, 영월, 단양, 문경 및 화순 탄전일대에 분포하며 무연탄과 다량의 화석을 함유하고 있기 때

문에 남한의 지질계통 가운데 조사연구가 가장 활발히 수행된 암종이다. 평안누층군은 과거에 북한의 평양탄전에서 명명되었던 홍점통, 사동통, 녹암통 및 고방산통을 남한에서도 사용해 왔으나 현재는 남한의 산출특성에 맞게 홍점통은 고목층군으로, 사동통과 고방산통은 월암층군으로, 녹암통은 황지층군으로 분류하여 사용되고 있다(Won et al., 1989). 특히 평안누층군 가운데 고목층군(홍점통)과 월암층군의 일부(사동통)는 탄산연암인 석회암을 협제하고 있어 수문지질 단위는 탄산연암으로 분류된다.

철암층군은 하위로부터 장성층, 함백산층, 도곡층 및 고한층으로 구분하며 장성층은 본층의 중부 및 상부에 분포하며 주로 흑색 사암과 셰일의 호층으로 이루어져 있다. 고방산층군은 주로 담색의 조립질 사암과 흑색, 갈색 및 회색의 셰일과 드물게 연속성이 불량한 무연탄층을 협제하고 있으며 하부의 장성층에 비해 침식에 대한 저항력이 강하여 주향방향으로 험준한 산릉을 이룬다. 고한층은 최하위층으로 회색의 중립 사암과 암회색의 세립 사암과 두터운 탄질셰일로 이루어져 있다. 황지층군은 녹색의 장석질사암, 사질셰일 및 역암과 박층의 셰일로 구성되며 하부는 주로 사암, 중부는 사암과 역암의 호층, 상부는 사질셰일과 사암의 호층으로 구성되어 있다. 곳에 따라 두께

가 수 m 정도 되는 자색세일과 사질세일이 협제되어 있고, 정선과 평창사이에 분포된 박쥐산향사에서 본층의 두께는 3,000여 m에 이른다.

2.2.2. 중생대 유라기의 대동층군과 경상누층군

1) 대동층군

대동층군은 영월, 단양 및 문경 일대에서 조선누층군과 평안누층군과 함께 분포하며 충청남도의 충남탄전과 경기도 김포 및 파주부근에서 국지적으로 분포한다. 이 층군은 유라기말의 대보조산운동의 영향으로 심한 습곡과 단층작용을 받아 암체내에 단열이 잘 발달되어 있다.

대동층군의 표식지는 북한의 평양부근의 대동강변으로서 이 층군은 선연층과 유경층으로 구성되어 있다. 남한에서 선연층에 대비되는 지층은 경상북도 문경의 단산층과 강원도 영월부근의 반송층군과 충청남도 남포부근의 남포층군 등이다. 남포층군은 충청남도 대천부근의 충남탄전일대에 널리 분포되어 있으며 암상에 따라 하부로 부터 월명산층, 아미산층, 조계리층, 백운사층 및 성주리층으로 세분된다. 월명산층과 조계리층은 유백색 또는 담회색의 역암과 사암으로서 측방변화가 심하며 아미산층과 백운사층은 흑색의 사암과 세일의 호층으로 이루어져 있고 두께는 2,200여 m에 이른다. 반송층군은 정선과 영월 및 단양지역에서 조선누층군과 평안누층군의 주향과 나란하게 부정합 또는 역단층으로 접하고 있으며 자색의 역암으로된 사평리 역암과 암회색의 사암과 세일로 구성된 현천리층 및 장석질 사암과 흑색세일로 이루어진 덕천리층으로 구분되고 총 두께는 700 m 정도이다.

2) 경상누층군

경상북도의 남부와 경상남도의 서부일대(경상남북도의 약 50%)의 진주, 마산, 대구, 의성, 영양을 따라 북북동 방향으로 폭이 약 20~50 km, 길이가 약 200 km이며 분포면적이 1만 km²(제주도 면적의 5.5배)에 이르는 경상누층군이 대상(帶狀)으로 분포되어 있다. 대보조산운동 후, 백악기에는 한반도에 경상분지를 비롯하여 여러 지역에 퇴적분지와 함몰지가 형성되어 이곳에 화산활동을 수반한 두터운 육성퇴적층인 경상누층군이 퇴적되었다. 경상누층군은 암상에 따라 Table 5와 같이 낙동층군, 신라층군과 유천층군으로 3대분 한다.

낙동층군은 암색에 따라 하부로 부터 낙동층, 하산동층, 진주층 및 칠곡층으로 구분하며 하산동층과 칠곡층은 간혹 적색층이 협제된 장석질 사암, 역암과 세일의 호층으로 이루어져 있으며, 낙동층과 진주층은 흑색 내지 암회색의 세일이 협제되어 있다. 낙동층군의 총 두께는 2,050~3,200 m이다.

신라층군은 암상에 따라 하부로 부터 신라역암, 함안층, 반야월층 및 건천리층으로 구분된다. 경상분지는 신라역암의 퇴적시기부터 활발한 화산활동이 있었기 때문에 신라역암의 역중에는 원마도가 높은 현무암력이 함유되어 있다. 특히 신라역암과 함안층 사이와 건천리층 하부에 4~5매의 현무암, 안산암질현무암 및 이들의 집괴암이 개재되어 있고 반야월층은 담수성 석회질암이 협제되어 있으며 신라층군의 두께는 1,000~5,000 m로 알려져 있다. 신라층군 가운데 건천리층의 퇴적시기는 백악기의 Cenomanian에, 반야월층과 함안층은 하부 백악기 상부의

Table 5. Correlation table of geological age and main rock formations between North Sahara aquifer system in North Africa and Kyongsang system in Korea

Geological age (North Sahara Aquifer System)		Kyongsang system/formation		Rock type
U	Turonian	YooChon form.		Andesite, lyolitic dacite, lyolite, tuff welded tuff, and sedimentary layers interbedded in afore said rocks
	Cenomanian	GunCheonri		Dark grey to blackish clayey shale, inter layered basalt & andesitic basalts in lower part
Cr	Albian	Shilla Gr.	BanYawol	Intercalated homogeneous reddish siltstone, shale and fresh water limestone
			HamAn	Green to grey siltstone, shale, intercalated basalts & agglomerate
L	Aptian	Silla conglomerate		Reddish gravelly sandstone w/mud crack, well rounded conglomerate inlayered w/basaltic gravels.
	Barremian	ChilGok		Reddish arkosic sandstone, shale, conglomerate
	Hauterivian	Nak-dong Gr.	JinJu	Blackish shale and siltstone
	Valanginian		HwaSanDong	Reddish arkosic sandstone, shale, conglomerate
Berriasian	NakDong		Blackish shale and siltstone	

Remark) Cr : Cretaceous, U : upper group, L : lower group Gr. : group

Albian에 속할 가능성이 제기된바 있다. 북아프리카의 알제리, 나이지르 및 말리에 분포되어 있는 북사하라 사막에는 주로 사암, 이암 및 dolostone으로 이루어진 백악기의 Albian에 속하는 CI(Continental Intercalaire)층이 널리 분포되어 있다. CI층은 투수성과 저유성이 매우 양호한 피압대수층으로서 국제 공유대수층이며 북 사하라 대수층계(SSAS, Septentrional Sahara Aquifer System)라 명명하여 현재 UN을 위시한 관련국들이 대대적으로 지하수자원을 개발 이용하려고 계획하고 있다. 경상누층군에 설치한 심정자료에 따르면 석회질암이 협재된 반야월층과 현무암/집괴암이 협재된 함안층 등은 지하수산출성이 매우 양호한 쇄설성 퇴적암으로 확인되었다(Hahn and Jeong, 1976). 따라서 신라층군은 암상이나 수리지질학적인 특성이 유사하여 하부 백악기의 상위에 속하는 북 사하라 대수층계와 대비된다. 경상누층군에 설치된 총 147개공의 심정자료를 분석한 바, 평균 심도 약 143 m의 심정 1개공당 지하수 산출량은 평균 584 m³/d이며 비양수량은 1.6~250 m²/d 규모이다.

2.3. 신생대 제3계와 제4기의 화산암류의 공극단열수/단열수

남한의 제3계는 동해안에 10여개소, 서해안에 2개소 및 제주도 서귀포시 등지에 소규모로 분포하며 포항분지에 가장 넓게 분포한다. 형성시기는 신생대 올리고세마이오세이며 암상은 고화되지 않은 역암, 사암, 셰일, 응회암

등이 호층을 이루며 수평 및 수직적인 분포의 변화가 심하다. 포항분지의 제3계는 하부로부터 장기층군, 범곡리층군, 영일층군으로 구분되며 이들 사이의 관계는 부정합적이다. 장기층군은 역암, 사암, 셰일, 조면암질과 안산암질 응회암의 호층과, 갈탄층이 협재되어 있으며 범곡리층군은 안산암질 및 현무암질 응회암에 사암, 셰일, 역암 및 갈탄층이 협재되어 있고 총 두께는 400여 m이다. 지표에서 노두의 형태로 제주도에 분포된 플라이오세의 서귀포층은 서귀포일원에 국한되어 있으나 그 동안 제주도에 설치된 지하수 관정자료에 의하면 제주도 전역에 서귀포층이 현무암 하부에 널리 분포되어 있으며 제주도 지하수산출에 큰 영향을 미치는 주요한 저투수성 지층으로 확인되었다.

쇄설성 퇴적암류에 설치된 총 294개공의 관정자료를 분석한 결과, 관정의 평균심도는 135 m이며 지하수 산출량은 1개공당 평균 683 m³/d(범위는 10~3,000 m³/d)이고 비양수량은 0.1~250 m²/d규모이다(Table 6). 쇄설성 퇴적암 가운데 지하수의 산출성이 가장 양호한 암류는 사암으로서 평균 126 m 심도의 우물 1개공당 평균 산출량은 924 m³/d이고 제3계는 평균 90여 m심도의 우물 1개공당 지하수 산출량은 694 m³/d 정도이다(Hahn, 1981).

2.4. 결정질암의 단열지하수

남한의 결정질 관입화성암과 변성암류에 설치된 우물의 지하수 산출상태는 Table 7과 같이 국내 암반 단열수가

Table 6. Number of well, well depth, pumping rate and specific capacity of water wells installed in clastic sedimentary rocks in South Korea

Rock type	No. of well	Depth (m)		Pumping rate (m ³ /d)		Specific capacity (m ² /d)
		Range	Mean	Range	Mean	
Sandstone	93	30~210	126.5	10~2,000	924.4	0.1~250
Shale	186	20~224	139.3	15~3,500	548.4	1.6~126.5
Kyongsang system	147	65~110	142.6	20~2,000	584	1.6~250
Daedong/Choseon system	10	70~224	132.4	10~500	182.3	0.1~1.87
Tertiary rock	19	35~150	89.7	60~1,779	694	1.0~21.8
Mean	294		134.8		683	0.1~250

Table 7. Number of well, well depth, pumping rate and specific capacity of water wells installed in intrusive igneous rocks and crystalline metamorphic rock in South Korea

Hydrogeological unit	No. of well	Depth (m)		Puming rate (m ³ /d)		Specific capacity (m ² /d)
		Range	Mean	Range	Mean	
Igneous rock - fissure water	458	35~300	101	1~1,300	277	-
Crystalline metamorphic rock Fissure water	448	21.5~200	98	2~1,200	192	8.6

데 산출성이 가장 불량하다. 특히 결정질암 단열수의 산출상태는 주로 암반 위에 분포된 풍화대의 두께, 대규모 단열의 발달상태와 규모 및 지형조건에 의해 좌우되므로 산출성이 양호한 구간의 선정은 철저한 수리지조사와 지구물리탐사에 의존해야 한다.

이상에서 설명한 바와 같이 국내에 발달된 주요 수문단위별 암반 지하수 가운데 탄산염암의 카르스트 공동단열수, 쇄설성 퇴적암류의 공극단열수와 제3 및 4기의 화산암류(제주도에 분포된 암류)의 공극-단열수 등은 그 산출상태가 상당히 양호한 것으로 파악되고 있지만 현재까지 제주도과 같은 범정부 차원의 지속적이고 체계적인 조사 평가가 수행된 바 없다. 따라서 일차적으로 이들 암류가 분포된 국내 읍면 단위의 중소규모의 인구밀집지들은 그 인근에 부존된 양질의 유망 암반 대수층에 부존된 지하수를 개발하여 친환경적이고 비용-경제적으로 지방상수도를 위시한 각종 대체용수로서 물공급 문제를 해결할 필요가 있다.

3. 전국의 지하수 온도(지중온도)분포와 연중변동 특성

3.1. 암반 지하수의 온도 분포

Fig. 1은 전국에 320개소의 관측정으로 구성된 국가 지하수 관측망 가운데 암반 포화대 구간(온도계측기의 설치 범위는 지표하 15~150 m 구간이고, 평균 설치심도는 지표하 24 m 지점)에서 1995년(일부는 2005년)~현재까지 측정된 지하수온도를 이용하여 1°C 간격으로 작성한 남한의 암반지하수온 분포도이다. 일반적으로 지표하 특정 심도에서 측정된 지하수온도는 해당지점의 지중 온도와 동일하므로 상기 지하수온은 지중온도로 보아도 무방하다.

이에 의하면 태백산맥과 소백산맥을 위시하여 조선누층군과 평안누층군 분포지역의 연평균 지중온도는 12°C~13°C로서 국내에서 가장 낮으며 이에 비해 경상북도의 남부지역과 경상남도의 중부 및 전라남도의 북동부 지역의 연평균 지하수온도는 비교적 높은 15~16°C이다. 이들 지역에 분포된 암층은 대체적으로 중생대의 경상계 퇴적층과 화강암이다. 특히 서울시, 경기도, 충청남북도와 전라북도의 중심부지역에 부존된 지하수의 연평균 온도는 13°C~14°C 정도이며 그 외 지역은 14°C~15°C 규모이다. 일반적으로 국내 지하수의 연평균 온도는 위도, 지형고도 및 암종에 따라 차이가 있으나 대체적으로 북북동향으로 발달된 옥천누층군를 중심으로하여 그 남쪽지역의 연평균 지하수온은 14°C 이상이고, 북쪽지역은 14°C 이하이다 (Hahn and Hahn, 2018).

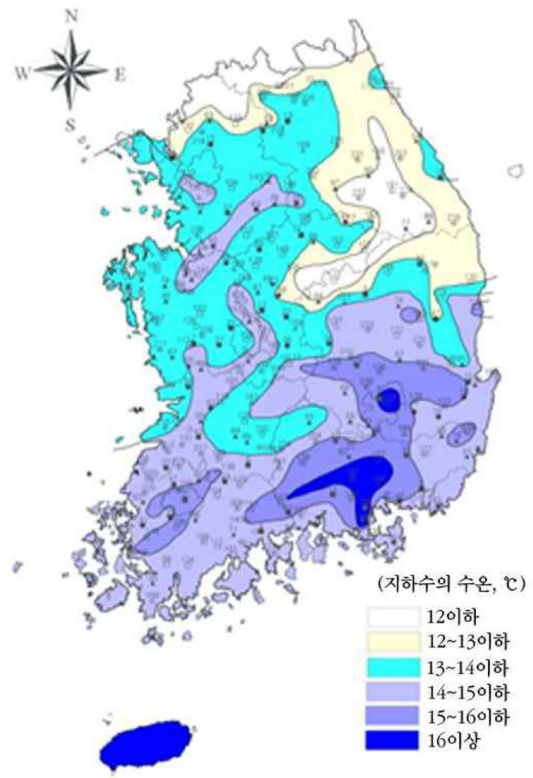


Fig. 1. Map showing the annual mean groundwater temperature (°C) of South Korea.

3.2. 암반지하수와 총적층지하수의 월평균온도 변화와 행정구역별 월평균온도 변화

국내 암반지하수와 총적층지하수(온도계측기의 평균 설치심도는 지표하 10.71 m)의 월평균온도 변화는 Fig. 2(a)와 같다. 총적층지하수의 월 평균온도의 연간 변동치는 2.3°C 정도이나 암반 지하수의 연간 변동치는 1°C 미만으로 연중 거의 일정한 온도를 유지하며 암반지하수의 연평균 온도는 14.5°C이고 편차는 0.9°C이다. 또한 총적층지하수의 연평균 온도는 14.3°C로서 암반 지하수의 연평균 온도와 대동소이하며 편차는 약 3.5°C이다. 암반지하수의 월평균 온도가 총적층지하수의 월평균 온도에 비해 연중 변화폭이 적은 이유는 암반지하수는 해당지역의 향온대보다 깊은 곳에 포장되어 있고 대기온의 영향을 적게 받기 때문이다.

총적층지하수와 암반지하수의 온도가 가장 낮은 시기는 여름철이 시작하기 전인 4월말과 5월 초순이며 지하수온이 가장 높은 시기는 겨울철이 시작하기 바로 전인 10월말과 11월초순이다. Fig. 2(b)는 우리나라의 행정구역별로 암반지하수의 월평균온도 변화를 도시한 그림이다. 이에 의하면 한반도 남단에 소재한 제주도와 경상남도 및 전라

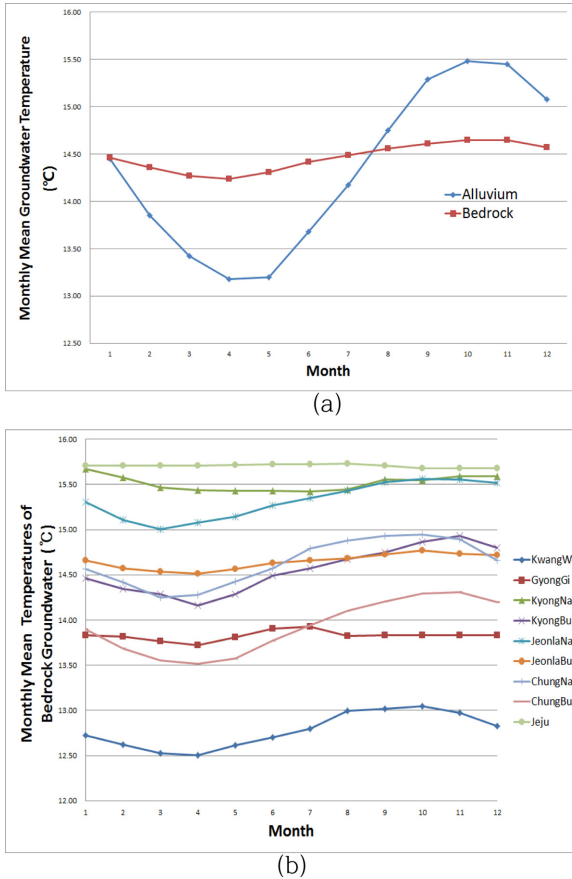


Fig. 2. Monthly mean temperature (°C) variations of alluvial and bedrock ground water (a) and those of bedrock groundwater in each provinces of South Korea (b).

남도의 월평균 지하수온도가 가장 높고 연간 변동폭도 가장 적는데 비해 남한의 북측에 소재하는 경기도와 충청북도의 월평균 지하수온도는 남단에 소재하는 행정구역의 월평균 지하수 온도보다 낮고 그 변동폭도 다소 크다. 특히 강원도에 분포된 암반지하수의 월평균 온도가 타 지역에 비해 가장 낮은 이유는 이 지역이 타 지역에 비해 고도가 비교적 높고, 북단 지역에 속하기 때문이다. 이에 비해 국내에서 최남단에 소재한 제주도의 분출화산암류에 저유된 공극단열수의 월평균온도는 연중 15.7°C로서 거의 변화가 없다. 바꾸어 말하면 국내 지하수와 천부 지중온도는 여름철에는 냉방열 원으로, 겨울철에는 난방열원으로 사용하기에 가장 양호한 수문지열학적인 조건을 구비하고 있다

4. 결론 및 제언

남한에 분포된 고결상태의 암석류들은 상당량의 심부

공극-단열형 암반지하수가 산출되고 있는 것으로 확인이 되고 있지만 현재까지 제주도와 같은 범정부 차원의 체계적인 조사 평가가 수행된 바 없다. 따라서 이들 지역별로 잠재 대수층들의 수리지질학적인 특성과 지하수의 산출특성을 규명하기 위한 조직적이고 체계적인 조사를 실시하여 제주도와 같은 양질의 풍부한 지하수자원의 개발가능성 여부를 세부적으로 확인해 둔다면, 현재와 같은 이상 기후에 따른 가뭄 해소는 물론 농어촌을 위시한 중소도시의 생활용수 공급을 위시하여 우리나라의 물문제 해결에 큰 획을 긋는 대역사가 될 것이다. 따라서 정부는 이들 잠재적인 양질의 용수공급원인 대수층의 분포상태와 그 산출성에 대한 종합적이고 범정부차원의 암반 지하수 조사사업을 조속히 실시할 필요가 있다. 특히 2015년 충청남도 보령댐의 용수공급 중단사례에서 경험한 바와 같이 기후변화 등 가뭄에 대응하기 위해서 광역체계에 의한 고비용의 용수공급 체계 보다는 해당지역 인근에 분포된 상술한 유망 잠재 대수층내에 부존된 암반 지하수자원을 적극적으로 개발하여 공급하는 방안도 필히 검토되어야 할 시점이다.

정부는 지금부터라도 지표수 위주정책에서 비가시적이라고 등한시하는 국내 지하수자원을 적극 개발·활용하는 정책을 펼쳐야 할 것이다.

특히 에너지 전량을 해외수입에 의존하고 있는 우리나라는 현재와 같은 예측 불허한 국제 유가변동, 조만간 닥쳐올 화석연료의 고갈, 교토기후협약에 따른 국제환경규제, 하절기 도시지역 열섬현상과 미세먼지 발생 문제에 적절히 대처하기 위해 청정·환경친화적이며, 에너지 절약형 및 비고갈성 재생에너지이면서 국내 어디서나 저렴하게 개발이용 할 수 있는 천부 지열 에너지자원의 개발 보급을 통해 에너지 저소비형 산업구조와 경제체질 개선이 필수적이다. 다행히 우리나라는 타국에 비해 천부 지열에너지 활용에 있어 매우 양호한 수문지열학적인 조건을 구비하고 있기 때문에 지표하 100~500 m 구간내에 부존된 천부 지열에너지를 이용한 냉난방사업을 보다 활성화시켜야 할 것이다.

References

Hahn, J.S. and Jeong, B.I., 1976, Groundwater resource of Kumho river basin, *Joul. Korean Asso. Hydro. Scin.*, 9(1), 9-23.
 Hahn, J.S., 1981, A study of bedrock groundwater of Korean peninsula, *Jour. Korean Asso. Hydro. Scin.*, 14(4), 73-81.
 Hahn, J.S., 1983, A study on limestone aquifer of Jeonchen

basin, *Jour. Korean Asso. Hydro. Scin.*, **16**(3), 171-179.

Hahn, J.S., 1985, A hydrogeologic and isotopic study on bedrock groundwater in Southern Korea, Dissertation for Ph.D, Korea University, 230-231.

Hahn, J.S., Hahn, K.S., and Lee, Y.D., 1988, A study on the optimum puming rate and water budget analysis of Kumchon well field, *Jour. Geol. Soc. Korea*, **24**(2), 140-172.

Hahn, J.S. and Hahn. Chan., 2015, Groundwater Management and Its Application, Naeha Publishing Co., Ltd, 273-311.

Hahn, J.S. and Hahn Chan., 2018, Geothermal Energy, Hanrim-

won Publishing Co., Ltd, 4.17-4.31.

JSSGP (Jeju Special-Selp Governing Province), 2003, Hydrogeology and comprehensive groundwater study of Jeju island(3), 1-425.

MLTM (Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs), 2012, National Master Plan of Groundwater in Korea, Seoul. 13.

Won, J.K., Lee, H.Y., Ji, J.M., Park, Y.A., Kim, J.H., and Kim, H.S., 1989, Introduction of Geology, Woosung Publisher, 613-619.