

한반도 동해안 유출 지하수에 대한 연구

김형수* · 김성주**

*한국수자원공사 수자원연구소 · **충남대학교 지질학과

요 약

우리 나라 동해안 지역에서 바다로 유출되는 지하수에 대한 예비적인 기초 자료 및 이들 지하수에 대한 활용 가능성을 검토하였다. 해안 유출 가능 지점의 선정은, 일차적으로 해수면 온도 분포 특성을 활용하였으며, 부차적으로 지형 및 지질 조건 등을 활용하였다. 온도 특성 분석을 위해서는 동해안 지역의 기후, 국가 지하수 관측망의 지하수 온도 변화, 실측된 해수 온도 및 원격 탐사 자료를 통해 유추된 해수 온도 분포 등이 활용되었다. 해안 유출 지하수 개발 가능성의 검토는 인구, 산업 분포 및 개발 입지 등을 고려하였으며, 해안 유출 지하수의 개발 방안은 지하수댐 및 지표수-지하수 연계 방식이 적합할 것으로 검토되었다. 해수면 온도 특성만을 활용하여 예비적으로 선정된 지하수 유출 가능 지점은 약 60여 개소이며, 인구, 산업 분포 및 지형, 지질 조건 등을 감안한 개발 유망 지점은 6 개소로 결정되었다. 그러나 이들 개발 유망 지점에 대한 구체적인 지하수 개발 가능성 및 취수 방안 설정을 위해서는 추가적인 현장 수문 지질 조사가 필수적이다.

주요어: 지하수, 동해, 지하수댐, 수온, 해저 유출

Hyoungsoo Kim and Seongju Kim, 2001, A Study on Groundwaters being Discharged into East Sea along the Shoreline of Southern Korean Peninsula. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 4, n. 1, p. 71-84

ABSTRACT: A study was initiated to investigate whether the groundwaters being discharged into the sea could be used as a possible water resources. This paper presents a preliminary information about the groundwaters being discharged along the shoreline of East Sea. Major discharge sites were selected primarily on the basis of the information on surface temperatures of the sea. Hydrogeologic and geographic conditions were also considered in selecting the major discharge sites. The development possibility of the discharging groundwater were estimated roughly, considering populations, industries and social development compatibilities of the selected areas. Groundwater dams and linked usage with surface water were suggested as possible development methods for the groundwaters. Based on this study, we selected about 60 sites as the major discharge areas and tentatively recommended 6 sites as optimal sites for development of groundwaters being discharged into the sea. However, detailed in-situ hydrogeologic surveys are required prior to the final decision.

Key words: Groundwater, East Sea, groundwater dam, water temperature, submarine groundwater discharge

(Hyoungsoo Kim, Water Resources Research Insitute, Korea Water Resources Corporation, 462-1, Jonmin-Dong, Yusung-Gu, Taejon, 305-390, Korea; hskim@kowaco.or.kr; Seongju Kim, Department of Geology Chungnam National University, 220, Kung-Dong, Taejon 305-764, Korea; s-pluto@hanbat.cnu.ac.kr)

1. 서 론

1.1. 연구 목적 및 범위

우리 나라는 다른 나라에 비해 강수량은 부족하지 않지만, 계절적으로 강우가 집중되며, 높은

인구 밀도 및 편중된 인구 분포로 인해, 계절적 지역적 수자원 확보와 분배에 어려움을 가지고 있다. 특히, 최근 들어 지표 댐 건설에 대한 사회적 저항 및 지역적인 수자원 분배의 불균형 등으로 용수 확보 및 공급에 많은 어려움이 예견되

고 있어 이에 대한 적절한 해결 방안이 절실하다. 이러한 용수 확보 및 공급에 대한 문제 해결의 일환으로 최근에는 지하수 증대 방안이 검토되기도 하였다(한국수자원공사, 1999). 대표적인 지하수 활용 방안으로 강변 여과, 직접 인공 침투지 및 지하수 댐을 활용한 지하수 인공함양 방식을 검토할 수 있다. 강변 여과, 직접 인공 침투지 및 지하수 댐을 활용하여 지하수자원을 확보한 예는 이미, 일본, 미국, 독일 등에서 활용하고 있는 기술로, 국내에서도 어느 정도 그 활용 가능성을 기대할 수 있다.

해안 유출 지하수는 일명 해저 지하수 유출(submarine groundwater discharge)로 불리기도 하며, 외국의 경우 라돈 및 라디움 동위원소(^{222}Rn , ^{226}Ra 및 ^{228}Ra) 등을 활용하여 연구되고 있다(Moore, 1996; Moore 2000; Hussain *et al.*, 1999). 또한 이들 연구의 결과가, 바다로 유입되는 담수의 많은 부분을 해안 유출 지하수가 차지하고 있는 것으로 보고되고 있어, 외국의 경우 이에 대한 활용 방안 및 조사/연구가 활발히 수행되고 있다. 그러나 국내의 경우, 해안 유출 지하수에 대한 조사 및 연구는 제주도 등의 도서 지역을 제외하고는 거의 수행되고 있지 않아, 그 유출량은 물론 존재 여부도 뚜렷하게 제시되지 못하고 있는 실정이다. 이미 많은 외국 자료에서 보고되고 있는 사항들을 감안할 때, 국내에서도 상당량의 지하수가 하천의 형태가 아닌 직접 바다로 유출될 가능성은 매우 높으며, 특히, 동해안 지역과 같이 해안 지역에 피압 대수층의 발달이 조사된 지역의 경우는 그 가능성이 더욱 높을 것으로 추측된다.

본 연구의 목적은 활용 가능한 지하수자원 중 동해안으로 유출되는 해안 유출 지하수에 대한 예비적인 자료 확보 및 개발 가능성 등을 검토하는 것이며, 연구 범위는 일차적으로 해수면 온도 자료, 지표 기후 자료, 지하수 수온 자료를 활용하여 지하수 해안 유출 가능 지점을 예비적으로 선정하고, 항공 사진 자료, 지형도, 지질조건 등을 이용하여, 유출 가능 지점에서의 지하수 개발 및 수자원 공급 여부를 개략적으로 조사/검토하는 것이다.

1.2. 지형 및 지질

우리 나라는 전형적인 동고서저의 지형으로 국토의 약 70%가 산지이며, 남한의 대표적인 산지는 강원도 북부 지역에서 경상북도 지역까지 발달되어 있는 태백산맥을 들 수 있다. 본 연구 대상 지역은 태백산맥 동편의 해안 지역이다(Fig. 1). 이 지역의 지형 고도를 보면 서쪽에 태백산맥이 길게 남북으로 뻗어 있어서 서편의 지형이 상당히 높는데 반해 동쪽은 해안에 접근하면서 상대적으로 완만한 경사를 가지고 있다. 한편, 남쪽으로 갈수록 산맥의 발달이 덜 현저하여 연구 북측 지역에 비해 상대적으로 낮은 고도를 가지고 있다. 연구 지역에 발달한 하천들은 대부분 태백산맥의 지형적 영향으로 수지상 또는 이수지상의 형태를 보이고 있으며, 많은 경우 동쪽과 남쪽의 영향을 갖는다. 하천 양측에는 충적층이 분포하고

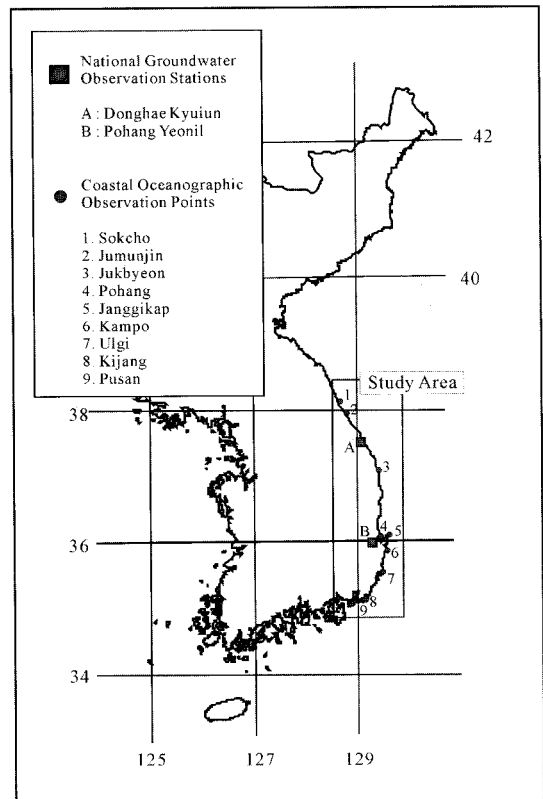


Fig. 1. Study area and observation sites for groundwater and sea surface temperature.

있으며 바다에 가까워 질 수록 그 분포가 넓어지는 일반적인 양상을 가지고 있다.

본 연구 대상지역은 상당히 광역적이기 때문에 지질 또한 매우 복잡하고 다양하다. 연구 대상 지역을 지체구조에 따라 분류하면 북부 지역은 경기육괴에 속하며, 중부 지역은 옥천대 태백산 지구, 남부지역은 소백산 육괴 소백산 지구, 경상분지, 환태평양 알카리 화산지구에 해당된다(대한지질학회, 1999). 연구 대상 지역의 지질을 크게 몇 가지로 분류하면 선캠브리아기의 변성퇴적암류, 중생대 화성암류, 관입암류, 퇴적암류, 제 3기의 화산암류와 제 4기 충적층 등으로 나눌 수 있다. 선캠브리아기의 변성퇴적암류에는 주로 편마암 및 편암이 주를 이루고, 중생대 화성암류에는 주라기 대보화강암과 백악기 불국사 화강암이 대표적이다. 관입암류는 고기의 것으로부터 중생대 불국사 중성 및 염기성암맥, 산성암맥이 해당된다. 퇴적암류를 이루고 있는 암석은 사암, 이암, 셰일, 석회암 등을 들 수 있다. 이들 퇴적암류는 앞에서 설명한 바와 같이 지표에 노출되어 편마암류 위에 분산되어 분포한다. 또한 연구 대상 지역을 볼 때 북부지역은 육성기원의 퇴적층에 해당되며, 반면 남부 지역은 해성기원의 퇴적층이 주로 분포한다(정창희, 1992). 제 3기의 퇴적층은 아주 협소하며 일부 동해안을 따라 몇 곳에서 이암, 사암, 셰일 및 역암 등의 형태로 분포한다. 화산암류는 일부 남부지역에 소규모 형태로 조면암, 안산암 및 현무암의 형태로 나타난다. 이 지역에서의 제 4기 충적층은 동해 연안 일대 수계를 따라 소규모로 분포하고 있으며, 상대적으로 중부 지역보다는 북부와 남부 지역에 많이 분포하고 있다. 이들 대부분은 하천이나 강이 바다로 유입되는 지점이나 해안 인접부에 얇게 피복되어 분포하고 있다.

2. 자료 수집 및 분석

2.1. 활용 자료

본 연구에서는 크게 여섯 종류의 자료를 활용하였으며, 활용된 자료의 획득 시기는, 획득 시기를 조정 할 수 있는 경우에 대해서는 Landsat 5

TM 위성 영상 획득 날짜를 기준으로 한 1997년 5월에 해당된다. 첫 번째 활용 자료는 기상 자료이다. 이들 기상 자료는 동해 연안 일대에 위치하고 있는 기상 관측소 및 자동 기상관측소로부터 확보한 기온, 강수량 등으로 속초를 비롯한 20 여 개소의 자료이다. 두 번째 자료는 지하수 수문 자료로써 국가 지하수 관측망 중 동해 연안 일대에 위치하고 있는 지하수 관측소에서 확보된 자료들이다. 1999년 현재 동해안에 설치된 국가지하수 관측소는 총 9 개소이지만, 1997년 5월 자료를 확보할 수 있는 곳은 2 개소뿐이었다. 이들 국가지하수 관측소로부터 획득한 자료는 지하수위, 지하수온, 전기전도도 등이다. 세 번째 자료는 동해 연안 일대에 위치하고 있는 해양 관측점에서 계측된 해수 표면 온도 자료이다. 이들 해양 관측점은 총 9 개소이며, 각 해양 관측점에서 측정된 자료는 근해의 월평균 해수 표면 온도이다. 네 번째 자료는 1997년 5월 17일의 Landsat 5 TM 인공위성 영상자료이며, 특히, 열적외선에 해당하는 6 번 밴드를 사용하여 동해 연안의 상대적인 해수표면 온도를 파악하였다. 다섯 번째 자료는 기상위성인 NOAA 위성의 온도 자료로, 기본적인 해상력이 떨어지므로, Landsat 5 TM 위성 분석 자료와 비교 분석되었다. 마지막으로 취락, 도로 및 기타 지역 발달 정도를 평가하기 위해 국립지리원의 항공 사진 및 지형도가 활용되었다.

2.2. 기상, 지하수 및 해양 관측 자료 분석

기상 자료는 인접 해안의 수온 분포를 통해 간접적인 지하수 유출을 조사 할 때, 무엇보다도 중요한 요소이다. 따라서 동해 연안 일대에 위치하고 있는 기상관측소 및 자동기상관측소의 자료를 사용하여, 관측소별 1997년 5월 한 달간의 평균 기온, 강수량 등을 조사하였다. 특히 5월 17일의 경우 하루 동안의 최고기온과, 최저기온 및 평균 기온을 조사하였다(기상청, 1997a; 기상청 1997b). 동해 연안 일대에 위치하고 있는 기상관측소 및 자동기상관측소의 위치는 총 23 개소이다. 1997년 5월 17일의 관측소별 기온 자료는 Table 1 에 정리되어있다. Table 1 에서 보여지는 관측소는 국가지하수 관측소, 해양 관측소의 위치를 고려하

Table 1. Distribution of Atmospheric Temperature around the East Sea.

Observation	Max. Temp. (°C)	Min. Temp. (°C)	Aver. Temp. (°C)
Sokcho	26.6	14.2	20.8
Hyeonbuk [*]	27.6	11.6	20.8
Jumunjin [*]	25.6	14.6	20.4
Kangneung	27.1	14.9	21.1
Kyeongpodae	26.2	13.9	20.6
Ogkye [*]	28.4	12.3	22.0
Donghae	26.3	13.5	20.8
Samcheok	-	-	-
Imwon [*]	26.6	9.4	18.5
Uljin	26.2	14.3	20.7
Hupo [*]	25.9	14.1	20.2
Yeongdeok	26.1	10.1	19.6
Cheongha [*]	28.8	12.2	21.8
Pohang	28.5	15.1	22.1
Janggikot [*]	28.0	14.4	20.9
Jihaeng [*]	30.4	9.5	21.8
Songdaemal [*]	22.2	12.8	17.5
Ulsan	28.0	12.2	21.0
Ulgi [*]	20.1	14.2	17.4
Ganjeolkap [*]	20.5	14.0	17.2
Ilkwang [*]	27	8.3	19.5
Pusan	24.5	14.2	19.7
Kimhae	25.5	10.7	19.9
Average	26.2	12.8	20.2

* : Automatic meteorological observations

여, 가능한 해안에 가까이 위치한 곳만을 선정하였다. Table 1에서 알 수 있듯이 전체 관측소에 대한 평균기온은 20.2 °C이며, 최고기온은 26.2 °C, 최저기온은 12.8 °C로 초여름의 기온을 보여주고 있다.

본 연구에 사용된 지하수 자료는 동해안 지역에 위치하고 있는 국가지하수 관측소의 자료로 관측 자료는 지하수위, 지하수온, 전기전도도 등이다. 이들 국가지하수 관측소 중 1997년 자료를 확보할 수 있는 지하수관측소는 1996년에 설치된

동해 귀운 관측소와 1995년에 설치된 포항 연일 관측소 두 개소로 각 관측소에서 암반, 충적층 2개 종류의 지하수 자료 4종이 활용 가능하였다(건설교통부·한국수자원공사, 1999). 동해 귀운과 포항 연일 관측소로부터 확보하여 사용한 자료는 Table 2에 정리되어있다.

각 각의 관측소는 Table 2에서와 같이 1일 6시간 간격으로 4회를 자동 측정하게 되며, 두 관측소에서 확보한 자료는 다시 암반 지하수와 충적층 지하수로 구분되어있다. 먼저 두 관측소를

Table 2. Grondwater Data obtained from the National Grondwater Observations.

Observation Station	Measurement time	Water level (EL:m)	Water temp. (°C)	Electrical conductivity ($\mu\text{s/cm}$)
Pohang Yeonil (rock fracture type)	00:10	2.04	14.8	1,470
	06:10	2.01	14.8	1,482
	12:10	2.03	14.8	1,482
	18:00	2.05	14.8	1,457
Pohang Yeonil (alluvium)	04:16	2.11	13.7	1,173
	10:16	2.13	13.7	1,173
	16:16	2.09	13.7	1,173
	22:16	2.10	13.7	1,173
Donghae Kyuiun (rock fracture type)	00:35	8.13	12.5	180
	06:35	8.12	12.6	180
	12:35	8.05	12.7	180
	18:35	7.99	12.8	181
Donghae Kyuiun (alluvium)	00:34	8.03	12.8	210
	06:34	7.99	12.9	210
	12:34	7.93	12.9	210
	18:34	7.91	13.0	205

<Pohang Yeonil : Surface EL 5.98 m, Donghae Kyuiun : Surface EL 13.96 m>

전체적으로 비교해 보면 포항 연일 관측소의 수위가 약 2m인데 반해 동해 귀운 관측소의 수위는 약 8m로 나타났으며, 이를 관측소 지표면 고도를 고려한 심도로 환산하면, 포항 연일의 경우 지표로부터 약 4m 전후, 동해 귀운의 경우 지표로부터 약 6m 내외인 것을 알 수 있다. 또한 두 관측소의 지하 수위를 보면 낮 시간에 비해 밤 시간에 지하수위가 상대적으로 높음을 알 수 있다. 그러나 이러한 현상이 주변의 지하수 사용과 관련된 것인지 조석의 효과인지는 뚜렷하지 않다.

한편, 지하수온은 포항 연일이 동해 귀운에 비해 2°C 정도 높은 값을 보여주고 있으며, 4개 자료 공히 지하수 온도 편차가, 대기 온도 변화가 10°C 이상인데 반해, 극히 작은 것을 알 수 있다. 또한 지하수온이 저녁 시간에 가장 높은 온도를 보이고 있어 대기 온도 최고점 시각과는 다소 지연된 최고점을 보이는 현상이 관찰된다.

전기전도도는 두 지역 모두 대체로 일정한 값을 보여주고 있으나, 동해 귀운에 비해 포항 연일이 5배 이상 높은 양상을 보이고 있어 포항 연일 지역의 지하수에 더 많은 용존 물질이 포함되어 있음을 알 수 있다.

지하수 수문 자료 분석 결과, 기상자료와 비교해 볼 때 평균 기온에 비해 지하수 온도가 약 7°C 이상 낮아 지표수 온도가 상대적으로 대기 온도에 민감한 점을 감안하면, 본 조사 시기의 자료가 온도 특성 분석을 통해 동해안 유출 지하수 조사에 활용성을 갖고 있음을 시사한다. 특히, 동해 지역은, 지하수 수온 자료가 같은 일자의 평균 기온과 약 12 내지 13°C의 차이를 보여주어 포항 지역에 비해 상대적으로 온도 특성 분석을 통한 유출 지하수 조사에 더 유리한 지역임을 보여주고 있다.

직접적인 해수면 온도는 해양관측자료를 통해 조사되었다. 해양관측지점은 우리 나라 주요 항구 도시에 위치하며, 이중 본 연구에서는 동해안에 위치한 지점들을 선정하여 자료를 확보하였다. 해양관측자료는 속초를 비롯한 총 9개 관측 지점의 자료로 1997년 월평균 해수 표면 온도 자료를 사용하였다(국립수산진흥원, 1997). 본 연구에 활용된 해양관측점별 월평균 해수면 온도변화 및 1997년 5월 17일자의 해수면 온도는 다음 Table 3에 정리되어있다.

Table 3에서 모든 관측점에 대한 월평균 해수

Table 3. Sea Surface Temperature(SST) of the Coastal Oceanographic Observations.

Month	Obsev.	Sokcho	Jumunjin	Jukbyeon	Pohang	Janggikap	Kampo	Ulgi	Kijang	Pusan
S e a s u r f a c e t e m p e r a t u r e	Jan.	7.01	6.88	8.33	9.41	11.07	12.32	13.19	12.88	11.51
	Feb.	5.98	6.61	9.59	9.31	10.31	11.72	12.21	12.19	11.89
	Mar.	7.99	8.54	10.35	10.71	12.12	12.37	12.87	12.74	12.78
	Apr.	12.04	12.49	12.39	13.29	13.75	13.68	13.30	13.50	13.79
	May	14.85	14.97	14.68	15.85	16.38	14.72	14.17	14.41	15.62
	May, 17	15.00	15.50	14.80	15.00	16.00	14.60	13.80	14.40	16.60
	June	18.20	18.23	17.22	19.80	19.84	17.81	17.29	17.36	18.27
	July	20.24	18.78	18.92	19.55	20.76	17.27	18.16	19.08	20.17
	Aug.	22.38	21.40	21.28	21.23	22.64	20.87	20.84	21.01	22.48
	Sep.	21.37	21.60	21.54	22.81	22.53	23.65	22.11	22.63	23.07
	Oct.	17.90	18.30	18.51	18.71	18.89	18.58	17.62	17.79	18.70
	Nov.	14.77	14.68	15.24	13.91	14.42	15.87	15.79	16.07	15.54
Dec.	9.20	11.04	12.24	11.12	11.87	14.37	14.73	14.45	13.64	
average		14.43	14.46	15.07	15.48	16.21	16.10	16.02	16.18	16.46

표면 온도를 보면 여름철인 7, 8, 9월에 가장 높은 양상을 보이는데 반하여 겨울철인 1, 2월에 가장 낮은 온도를 보이는 것으로 보아 계절의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 5월 중순 자료들을 5월 17일 평균 기온과 비교한 결과 약 5 내지 6 °C 정도 낮은 것으로 나타났다. 또한 이 자료를 지하수 온도와 비교한 결과 약 2 °C 정도 더 높은 것으로 조사되었다. 이는 본 연구에서 활용된 자료가 5월 17일자임을 감안하면 여름철에는 더 큰 차이를 보일 것으로 생각되며, 수온 분포를 통한 유출 지하수의 조사에는 8월경의 자료를 활용하는 것이 본 연구에서 활용한 시기의 자료보다 더욱 효과적일 것으로 판단된다.

Fig. 2는 주문진, 죽변 및 포항 해양관측지점에서의 해수 온도와 동해 귀운과 포항 연일의 국가 지하수 관측소 지하수 월평균 온도의 그래프를 비교한 것이다. Fig. 2에서 해양관측지점에서의 연안 해수 온도 자료를 보면 각 각 2월에서

최저의 온도를 보이는 반면 8월 또는 9월에 최고 온도를 보이고 있다. 동해 귀운의 경우에는 압반, 충적층 지하수 모두 8월에서 가장 높은 온도를 보이고 있으며, 포항 연일과 동해 귀운의 지하수 수온을 비교해 볼 때, 동해 귀운이 포항 연일에 비해 온도가 변화가 많은 점으로 미루어 동해 귀운 국가지하수 관측소의 지하수가 계절적인 영향에 민감함을 알 수 있다. 본 연구에 사용된 5월의 해수, 지하수 온도 자료들을 살펴보면 해수 온도가 지하수 온도에 비해 약 3 °C 내외 더 높다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 시기에 연안에 뚜렷이 낮은 해수 온도를 갖는 지점의 경우는 해안 유출 지하수와 연관되어 있을 가능성이 높음을 인지할 수 있다.

3. 원격 탐사 자료 분석

3.1. Landsat 5 TM band 6 자료 분석

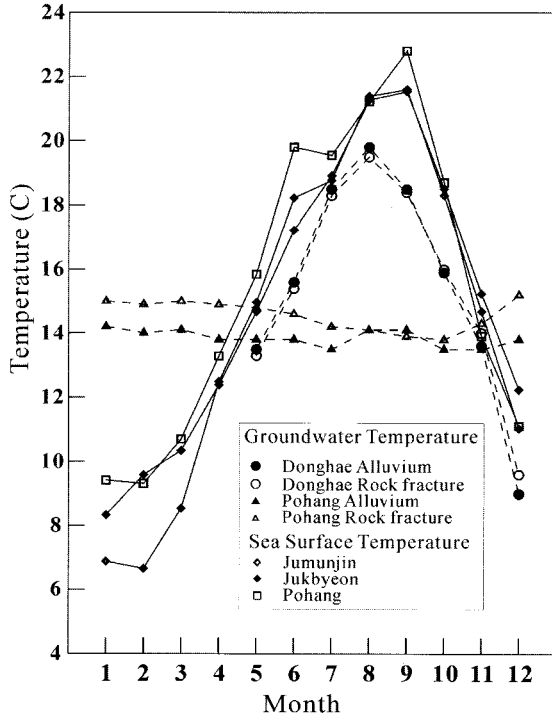


Fig. 2. Groundwater and sea surface temperature variations in 1997.

본 연구에 사용된 원격탐사 자료는 Landsat 5 호 위성의 TM 센서에 의하여 1997년 5월 17일에 획득된 Path-114, Raw-34, 35, 36 자료로 이들 총 3 개의 full scene에서 해안선만을 추출한 subscene 들이다. 자료 획득에 이어 가장 우선적으로 적용된 자료처리의 절차는 기하보정 및 좌표일치로서, 이는 원격탐사 자료가 구조적으로 내포하고 있는 기하학적인 왜곡을 보정하는 동시에, 지리적인 좌표계를 부여하기 위한 과정이다(Jensen, 1996). 재배열 방법으로는 흔히 nearest neighbor, bi-linear 및 cubic convolution 방법들이 주로 사용된다. 각각의 방법들은 고유의 장·단점을 가지고 있으며, 최근린 내삽법의 경우, 영상으로 표현하였을 때 부드럽게 보이지는 않지만 당초의 자료값과 다른 새로운 수치값을 생성하지 않는다는 장점을 가지고 있다(Bernstein, 1983). 본 연구에서는 획득된 Landsat TM 영상 자료의 기하보정 및 좌표일치를 위하여 해안선 및 인공구조물들을 중심으로 각각 20 여개의 GCP를 선정하였다. 기하보정시

자료처리상의 효율성을 위하여 500×500의 공간 해상도를 가지는 자료로서 재배열은 최근린 내삽법을 통하여 이루어졌다. Band 6은 10.4 ~ 22.5 μm의 파장 영역으로 120 × 120 m의 해상도를 가지고 있어 상대적으로 다른 밴드에 비해 해상도가 낮다는 단점을 가지고 있으나, 열적외선을 사용하므로, 해상 및 육상의 상대적인 표면 온도 분포를 확인에는 탁월한 효과가 있다. 열적외선 밴드는 열적인 상태에 대한 정보를 포함하고 있으며 흔히 식생의 건강상태, 토양의 수분함량 등에 대한 정보를 포함하고 있어 비교적 폭넓게 쓰이고 있다. 전형적으로 열적외 영상들은 중파(3 ~ 8 μm) 또는 장파(8 ~ 14 μm) 적외선(IR: Infrared Ray) 영역에서 처리된다. 대부분의 정량적인 작업은 태양의 반사 효과를 피하기 위해 주간 시간의 중파 또는 장파 적외선을 제외하고, 밤시간에 중파 또는 장파 적외선을 이용한다. 따라서 본 연구와 같이 Landsat 5 TM band 6을 사용하는 경우 파장 영역이 10.4 ~ 12.5 μm이므로 주간 시간의 중파 적외선은 포함되지 않는다(Schott, 1989). 한편 열적인 자료를 이용하여 인공위성 센서에 받아들여진 복사량을 측정하는 방식은 몇 가지 식을 이용할 수 있으나, 본 연구에서는 NASA에 의해 개발된 아래 식 (1)을 사용하였다. 센서에서 받아들여진 복사량은 일련의 수학적 과정을 거친 후 표면 온도로 환산될 수 있다.

$$L_{\lambda} = L_{\lambda \min} + \left(\frac{L_{\lambda \max} - L_{\lambda \min}}{DN_{\max}} \right) DN_{\text{value}} \quad (1)$$

여기에서, L_{λ} 는 센서에 의해 감지된 복사량, $L_{\lambda \min}$ 는 Landsat 5 TM band 6에서 확인된 최소 복사량 ($0.1238 \text{ mWcm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), $L_{\lambda \max}$ 는 확인된 최대 복사량 ($1.56 \text{ mWcm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), DN_{\max} 는 최대 gray level (255), DN_{value} 는 분석된 각 pixel의 gray level임. L_{λ} 의 값들은 길보가 표면 온도의 값들로 변환하기 위해서는 아래 (2)식을 활용할 수 있다 (Markham and Barker, 1986).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left[\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right]} \quad (2)$$

여기에서 T 는 겉보기 온도 (K), $K_1 = 60.776 \text{ m Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ 이고, $K_2 = 1260.56 \text{ K}$ 이다.

3.2. NOAA 위성 해수 표면 온도 분석

NOAA 인공위성은 미국해양대기청(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에 의해 운용되고 있는 기상관측 위성이다. 이 위성자료의 주된 활용 목적은 해양이나 기상에 대한 연구이고, AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 센서에 의해 주로 구름 분포, 해역 온도 분포 등을 관측한다.

NOAA 위성 자료는 공간해상도(LAC:1.1 km × 1.1 km, GAC:4 km × 4 km)가 낮지만 분광해상도 및 방사해상도(10 bit)가 뛰어나며 한번의 관측으로서 획득되는 자료의 공간적 규모가 매우 크다 (2400 km). 또한 시간해상도가 매우 뛰어나기 때문에(1/2 day) 광역적인 규모에 대한 정량적인 접근이 필요한 경우에 자주 활용되고 있다(Lillsand and Kiefer, 1994).

Fig. 3은 1997년 5월 17일 우리나라 인근 해역에 대한 NOAA 위성 자료(한국해양연구소1999, 웹사이트 제공 자료)로 해수면 온도분포를 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 1997년 5월 17일 04시 55분의 자료이며, (b)는 같은 날 19시 00분의 자료를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)를 보면 우리나라 동해 북부지역에 구름이 걸쳐 있어 검은색으로 나타나고 있음을 볼 수 있다. 일반적으로 구름이 걸쳐있는 지역은 NOAA 인공위성의 전자파가 투과를 하지 못해 온도자료를 얻을 수 없다. (b)의 경우 (a)의 경우보다 남해를 위주로 구름이 짙게 걸쳐있는 것을 볼 수 있으나 다행히도 동해 북부 지역이 잘 보이고 있다.

Table 4는 NOAA 위성자료로부터 획득된 자료로부터 처리된 해수 표면 온도를 보여주고 있다. 본 연구의 목적에 따라 NOAA 자료로부터 획득하고자 했던 해수 표면 온도 지역은 총 9개 소로, 원하는 지역에 가장 인접한 2개 셀의 대표 온도를 통해 그 지역의 해수 표면 온도를 산출하였다. 이중 속초 지역을 제외하고는 모두 17시 19분에 획득된 자료에서 해수 표면 온도를 산출할 수 있었으며, 속초 지역의 경우는 04시 55분의

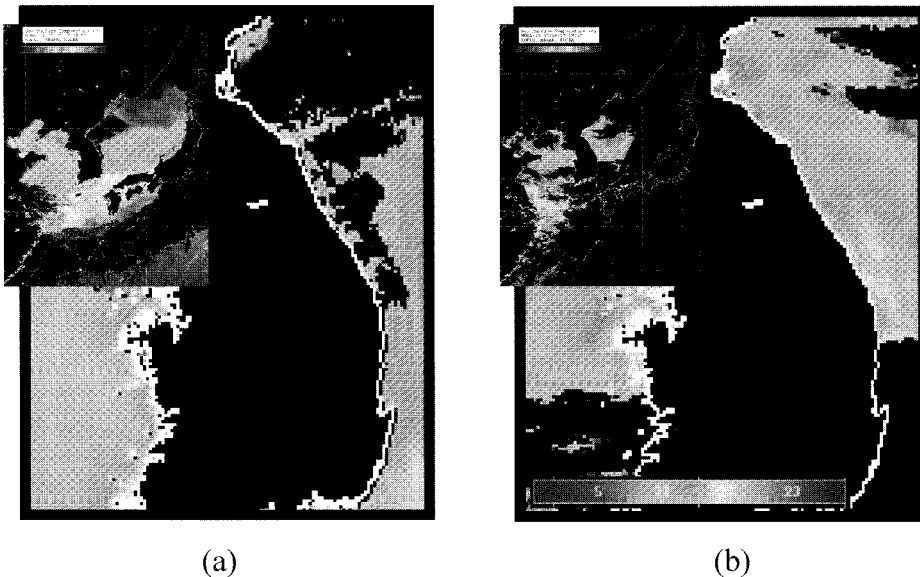


Fig. 3. Temperature distribution of East Sea(data from KORDI ocean observation data) (a) Data at 04:55, 1997/05/17, (b) Data at 19:00, 1997/05/17.

Table 4. Sea Surface Temperature(SST) of NOAA AVHRR Sensor(KORDI, 1999, private communication).

Observation Location	Sokcho	Jumunjin	Jukbyeon	Pohang	Janggikap	Kampo	Ulgi	Kijang
	38.2088 128.605	37.8875 128.83	37.0577 129.433	36.0436 129.3872	36.0763 129.575	35.8055 129.5111	35.4911 129.4432	35.1872 129.2263
		37.88343 128.8734	37.06425 129.465	36.05316 129.4776	36.07351 129.4776	35.80853 129.5783	35.49144 129.4776	35.19336 129.2636
04:55	-	-	37.05421 129.4524	-	36.07351 129.60351	35.79832 129.5675	-	-
T		14.8	14.0	15.3	15.2	13.2	15.3	14.5
i		-	14.4	-	14.5	13.2	-	14.7
m	38.21056 128.609	-	-	-	-	-	-	-
e	38.20064 128.609	-	-	-	-	-	-	-
17:19								
	12.12	-	-	-	-	-	-	-
	12.40	-	-	-	-	-	-	-

Table 5. Results of spectral radiance and temperature calculated from DN values.

DN value	L_{λ} ($mWcm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)	Temperature (K)	Temperature (°C)	Difference (°C)
0	0.124	203.371	-69.779	1.467
1	0.129	204.839	-68.312	1.425
2	0.135	206.263	-66.887	1.385
3	0.141	207.648	-65.502	1.348
4	0.146	209.996	-64.154	1.314
5	0.152	210.310	-62.840	1.281
110	0.743	285.456	12.306	0.483
111	0.749	285.939	12.789	0.481
112	0.755	286.419	13.269	0.479
113	0.760	286.898	13.748	0.477
114	0.766	287.375	14.225	0.475
115	0.772	287.850	14.700	0.473
250	1.532	340.175	67.025	0.329
251	1.538	340.504	67.354	0.3283
252	1.543	340.833	67.683	0.3277
253	1.549	341.160	68.010	0.3271
254	1.554	341.487	68.337	0.3265
255	1.560	341.814	68.664	

자료에서 해수 표면 온도를 산출할 수 있었다. 이들 자료를 해양관측지점에서 직접 측정된 수온과 비교하여 보면 NOAA 위성의 자료가 다소 낮은 온도를 갖는 것을 알 수 있으며, 이는 NOAA 위성에서 관측된 자료는 1개 셀의 대표 값으로 그 범위가 넓고 구름, 대기 및 분진 등의 영향에 의한 일부 복사에너지의 손실 때문으로 사료된다.

4. 자료 분석 및 해석

4.1. 표면 온도 분석

Landsat 5 TM에는 열적외선 영역 band 6 (10.4 ~ 12.5 μm)에 대한 자료를 확보할 수 있는 센서를 탑재하고 있으며, 자료 획득 당시 넓은 지역에 대한 지표 및 해수 표면 온도를 산출할 수 있다. 먼저 온도를 분석하기 위해서는 복사량을 측정해야 한다. 이미, 언급한 바와 같이 복사량은 최종적으로 센서에 의해 받아들여진 것으로 지표면 복사량, 태양복사에너지, 대기의 투과율 등의 요소를 포함하고 있다. 흔히 복사량을 구하는 식은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 단순히 DN 값을 이용한 온도를 산출하였다. Landsat 5 TM의 경우 DN값의 범위는 0 ~ 255로 모든 화소는 이들 숫자로 표시된다. 본 연구에서는 우선, Landsat 5 TM band 6의 DN값에 따라 L_{\min} , L_{\max} 와 L_d

산출한 후, 이를 통해 온도를 산출하였으며, 그 결과는 Table 5에 정리되어 있다.

온도분석 결과 최소 -69.78 $^{\circ}\text{C}$ 에서 최대 68.66 $^{\circ}\text{C}$ 를 보이고 있으며, 각 DN값간의 기본 단위차이는 최대 1.47 $^{\circ}\text{C}$ 에서 최소 0.33 $^{\circ}\text{C}$ 이며, 평균 차이는 0.54 $^{\circ}\text{C}$ 로 확인되었다. 전체적으로 DN값이 높아질수록 온도가 높아지며, 각 DN값간의 온도 차이는 감소하는 양상을 보인다.

4.2. 해안 유출 지하수 가능 지역 일차 선정

Landsat 5 TM으로 조사된 해수 표면온도를 통해 동해안 일대에 대하여 개략적인 1차 지하수 유출 예상 지점을 선정하였다. 1차 유출 예상지점을 선정한 기준은, 단순하게 단일 band 6을 이용하여 color mapping을 실시한 상대적인 온도분포만을 고려하였다. 일차적으로 이러한 해수의 상대적인 온도 차이를 세밀하게 관찰하기 위해서 우선 full scene의 위성 영상을 해안선 포함하게 500 \times 500 pixel 크기의 subscene으로 나눈 후, 시각적으로 낮은 온도의 바다 지점을 구분하기 좋게하기 위해 육지는 흑백 처리하고 바다는 강제로 color mapping을 수행하였다. 이러한 과정을 통해 해안 지역 중 주변부에 비해 뚜렷하게 온도가 낮은 값을 보이는 지점을 선정하였다. 선정된 지점에 대한 결과는 Table 6에서 보는 바

Table 6. Analysis of the groundwater discharge potential area.

Potential areas	Expected sites	Potential areas	Expected sites
Kangeung area	5 Sites	Heunghae, Pohang area	4 Sites
Okye, Kaneung area	3 Sites	Pohang area	2 Sites
Donghae area	2 Sites	Kuryongpo, Youngil area	1 Sites
Samcheok area	2 Sites	Janggi, Youngil area	2 Sites
Keundeok, Samcheok area	0 Sites	Kampo, Kyounju area	1 Sites
Jukbyeon, Uljin area	2 Sites	Jeongja, Ulsan area	2 Sites
Keunnam, Uljin area	4 Sites	Bangeojin, Ulsan area	1 Sites
Wonnam, Uljin area	3 Sites	Onsan, Ulsan area	4 Sites
Pyeonghae, Uljin area	3 Sites	Ilkwang, Ulsan area	0 Sites
Hupo, Uljin area	2 Sites	Kijang, Kijang area	4 Sites
Chuksan, Youngdeok area	5 Sites	Pusan area	4 Sites
Youngdeok, Youngdeok area	3 Sites	Kimhae area	2 Sites
Namjeong, Youngdeok area	3 Sites	Jinhae area	1 Sites
Total		64 Sites	

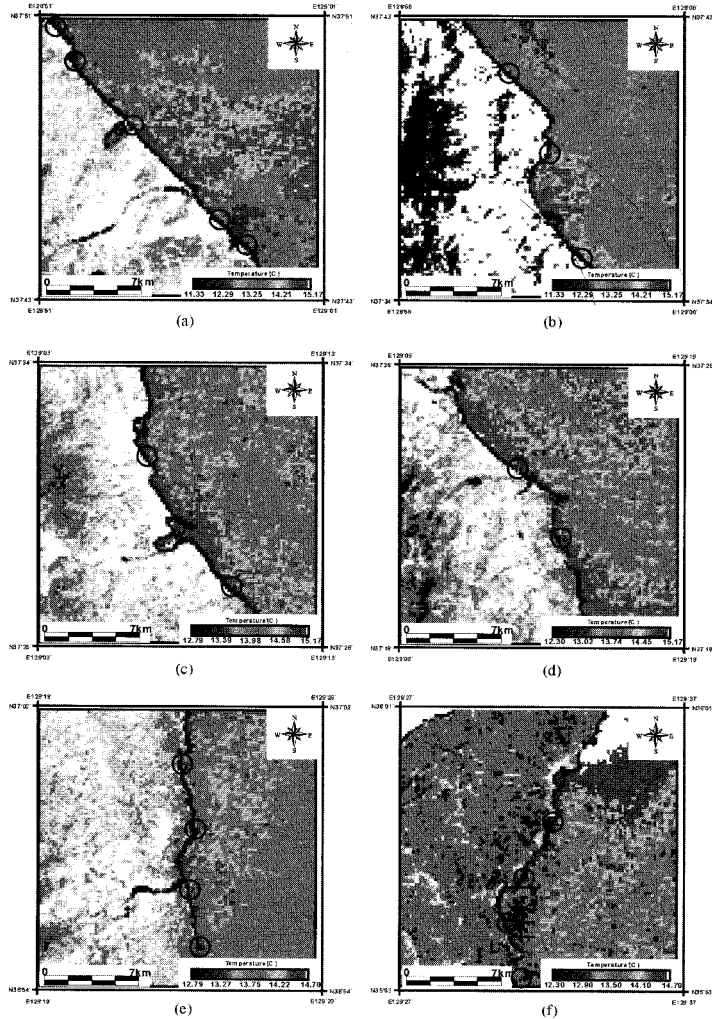


Fig. 4. Sites selected for the developments of submarine-discharged groundwaters as possible water resources in the coastal area of the East Sea. (a) Kangneung area (b) Okye area (c) Donghae area (d) Samcheok area (e) Uljin area (f) Kuryongpo area.

와 같이 지역별로 총 64 개소의 지점들을 선정할 수 있었으며, 상대적으로 연구 지역의 중북부 지역이 남부지역에 비해 유출 지하수 가능 지점이 많은 것으로 나타났다. Fig. 4는 이들 subscene 중 강릉, 옥계, 동해, 삼척, 울진 및 구룡포 지역에 대한 자료를 보여준다.

4.3. 해안 유출 지하수 활용 수자원 개발 가능 지점 선정

해안 유출 지하수 예상 지점 총 64 개의 지점

에서 취락 및 인구 분포, 지형, 지질 등을 고려하여 해안 유출 지하수를 활용한 수자원 개발 가능 지점을 선정하였다. 사회 발달 상황 및 자연 지질적인 여건은 항공 사진 및 1:25,000 지형도를 활용하였으며, 지질 조건은 1:50,000 지질도폭을 활용하였다. 해안 유출 지하수 활용 수자원 개발 가능 지점을 선정하기 위한 고려 사항은 다음과 같은 기준을 근거하였다. 첫째, 이미 집중적인 취락, 항만, 공단 또는 기타 사회 시설물이 존재하여, 실질적인 개발이 곤란한 지점 또는 항공 사진 확

Table 7. Possible development areas using groundwater which discharge into ocean.

Final possible area	Classification by hydrogeology	Expected sites
Kangneung area	Qa, Ps, In	Site 5
Okye area	Qa, Ps, Ls	Site 8
Donghae area	Qa, Ls, Cs, Me	Site 10
Samcheok area	Qa, Me, In	Site 12
Uljin area	Me, Ls, In	Site 16
Kuryongpo area	In, Cs	Site 46
Total		6 Sites

인 결과 중규모이상의 하천이나 호수 지점은 제외하였다. 둘째, 유출 가능 지역 약 15 km 이내에 인구 밀집 또는 공단 지역이 위치하여 개발된 수자원의 공급지를 가지고 있는 지점을 선정하였다. 셋째, 주변 지질 조건이 충적층, 신기 및 고기퇴적암류 또는 석회암 지층과 같이 수문지질학적으로 유리한 지층을 가지고 있는 경우를 선정하였다. 이때, 충적층 분포는 기존의 지질 도폭 및 충적층 조사 자료(한국수자원공사, 1996)를 활용하였다. 이러한 조건들 중 우선, 첫 번째 및 두 번째 조건을 만족하는 지점은 약 30 여 개소였으며, 세 번째 조건까지 만족하여, 최종적인 유출 지하수 활용 수자원 개발 가능성이 가장 높게 평가된 지점은 총 6 개소인 것으로 나타났다. Table 7은 선정된 지점들을 정리하여 보여준다. Table 7에서 수문 지질 단위는 충적층(Qa), 고기퇴적암류(Ps), 신기퇴적암류(Cs), 석회암(Ls), 변성암류(Me) 및 관입암류(In)으로 표기하였다.

5. 결론 및 의견

본 연구의 대상 지역은 우리 나라 동해안 일대 전역으로 상당히 광범위한 지역에 해당된다. 이러한 광범위한 연구 대상 지역에 대해 해안 유출 지하수를 정밀하게 조사/분석하는데는 한계가 있으므로 우선적으로 온도 분포 특성 및 지질 조건 등을 기초한 개략적인 해안 유출 지하수 가능성

지점 및 이를 활용한 개발 가능 지점을 검토하는 것에 주안점을 두었다.

본 연구를 통해 밝혀진 사실은 다음과 같이 구분 가능하다.

첫째, 동해안 지역의 지하수 온도는 여름과 겨울철에 뚜렷이 근해의 해수면 온도와 비교되므로 온도 분포 특성을 활용하여 예비적인 해안 유출 지하수 조사를 수행할 수 있음을 보여주었다. 실질적으로 본 연구에서 사용된 1997년 5월 17일의 동해안 지역의 평균 기온은 17 내지 22 °C의 범위를 가지며, 이는 동해 귀온과 포항 연일 국가 지하수관측소에서 관측된 지하수 수온에 비해 5 내지 10 °C의 차이를 보여주고 있다. 또한 실측된 해수면의 온도 역시 지하수 온도에 비해 약 2 내지 3 °C 높은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 혹한기와 혹서기에 더욱 뚜렷이 나타날 것으로 추정된다.

둘째, Landsat 5 TM band 6 자료를 사용할 경우, 온도 해상력이 약 0.5 °C, 공간적인 해상력이 120 × 120 m이므로 해안으로 유출되는 지하수에 대한 광역적인 조사에 충분한 정보를 제공할 수 있다. 또한 해수면 온도에 대한 절대 온도 산출시에 비록 해상력이 떨어지긴 하지만 NOAA 위성을 통해 획득된 온도 자료를 보완적으로 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

셋째, 온도 분포 특성을 활용하여 조사된, 동해 연안 일대의 해안 유출 지하수 가능지점은 약 60

여개소 이상이며, 상대적으로 연구 지역의 북부 지역이 남부 지역에 비해 해안 지하수 유출 가능 지점이 많은 것으로 나타났다. 또한 사회적인 여건과 자연적인 여건을 고려하여 해안 유출 지하수를 활용하여, 중소규모의 수자원을 공급할 수 있는 지하수 개발 가능 지점은 6개소 내외인 것으로 조사되었다.

넷째, 동해안 유출 지하수에 대한 개발 방안은 지하수 댐 활용 방식과 지표수-지하수 연계 방식의 이용을 고려할 수 있다. 지하수 댐의 경우는, 층적층이나 석회암층과 같이 대수성이 양호한 지층에 대해서 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 이러한 투수성 발달이 현저한데 반해, 지표수 유출이 소규모인 지점인 경우, 지하로의 유출 가능성이 매우 높으므로 지하수의 유동 경로를 정밀 조사하여 적지에 지하 차수벽을 설치하는 경우, 충분한 차수효과와 저수 효과를 발휘할 수 있어, 바다로 유출되는 지하수를 효율적으로 개발/이용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 동해안 지역이 바다에 인접하여 있으므로, 지하 차수벽이 염수 침입의 피해를 최소화 할 수 있다는 장점도 함께 갖는다. 지표수-지하수 연계 방식은 동해안에 이미 건설되어있거나 건설 예정인 소규모의 용수 전용댐과 유출 지하수를 연계하여 사용하는 방식으로 상대적으로 유량 및 증발산이 높은 하절기에는 지표수를 우선적으로 활용하고, 유량 및 증발산이 적은 동절기에는 유출 지하수를 활용하여 시기적으로 지표수와 지하수를 효율적으로 개발 공급하는 방안을 생각 할 수 있을 것이다.

그러나 본 연구는, 현장 조사를 통해 선정된 지점들에 대한 검증이 수행되지 않은 점과 온도 분포 특성을 활용하는데 상대적으로 유리한 시기의 자료인 흑한기 및 흑서기의 자료를 활용하지 못한 점은 추후의 계속적인 연구 및 조사를 통해 보완되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 이미, 미국을 비롯한 외국에서 수행중인 라돈 및 라듐 동위 원소 등을 활용한 직접적인 유출 지하수 조사 등에 대해서도 연구되어 유출 지하수의 정량적인 양적 평가 등이 수행되어야 할 것이다. 한편, 해안 유출 지하수의 존재가 직접적으로 확인될 경우, 우리나라 내륙의 지하수가 대부분 하천의 형

태로 바다로 유출된다는 가정 아래에서 수행된 하천 기저 유출 분리 방식에 의한 지하수 개발량 평가에 대해서도 문제가 제기되게 된다. 이러한 점은 앞으로 국내 가용 지하수 개발량에 대한 산정 시에 해안 유출 지하수를 고려하여야 함을 시사한다. 해안 유출 지하수에 대한 조사 및 활용은 현재까지 국내에서 활용되지 못한 새로운 수자원에 대한 도전으로 앞으로 추가적인 조사와 연구가 매우 절실하다.

사 사

본 연구는 국무총리실 수질개선기획단 <98년도 물관리 종합 대책> 실천 과제의 일환으로 한국수자원공사 수자원연구소에서 1998년부터 1999년까지 수행된 “지하수 함양 및 활용증대 방안 연구”의 일부이다. 이에 대한 연구 예산 및 인력을 지원해준 건설교통부 및 한국수자원공사에 감사한다. 또한 국가지하수 관측망 자료를 제공하여준 한국수자원공사 조사기획처 지하수부 담당 직원, 많은 양의 항공 사진을 제공하여 준 국립지리원의 담당 직원, Noaa 위성 자료를 활용할 수 있도록 협조해 주신 한국해양연구원 담당 직원께도 감사한다. 마지막으로 외국 학술지에 소개된 해안 유출 지하수에 대한 연구 정보를 제공하여 본 연구 소재에 대한 아이디어를 제공하여준 서울대학교 지질과학과의 이기화 교수와 원격탐사 자료 처리에 많은 지도를 주신 충남대학교 지질학과 송무영 교수, 논문의 영문 요약 및 본문에 대한 꼼꼼한 교정을 보아준 군산대학교 토목환경공과의 김강주 교수께 이 자리를 통해 감사의 마음을 전한다.

참고문헌

- 건설교통부·한국수자원공사, 1999, 지하수관측연보
- 국립수산진흥원, 1997, 해양관측연보
- 기상청, 1997a, 기상월보
- 기상청, 1997b, 자동기상관측연보
- 대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 시그마프레스.
- 정창희, 1992, 지질학개론, 박영사.
- 한국수자원공사, 1995, 층적층 지하수 산출특성과 활용

방안 연구 보고서.
한국수자원공사, 1999, 지하수 함양 및 활용증대방안 연구, 198pp
한국해양연구소, 1999, 웹사이트 제공 자료 및 개인 요청 전산 처리 자료
Bernstein, R., 1983, Image Geometry and Rectification, Chapter 21 in The manual of Remote Sensing, R. N. Colwell, ed: Americal Society of Photogrametry, Vol. 1., p. 875-881.
Hussain, N., Church, T.M., Kim, G., 1999, Marine Chemistry 65, 127-134.
Jensen, J.R., 1996, Introductory digital image processing, Prentice-Hall.
Lillsand, T. M., and Kiefer, R. W., 1994, Remote Sensing and Image Interpretation 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc.
Markham, B. L., and Baker, J. L., 1986, Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric

reflectances and at-satellite temperatures, Landsat Technical Notes, No. 1, EOSAT, p. 3-8.
Moore, W. S., 1996, Large groundwater inputs to coastal waters revealed by 226Ra enrichments, Nature, 23, 647-651
Moore, W. S., 2000, Determining coastal mixing rates using radium isotopes, Continental Shelf Research, 20, 1993-2007
Schott, J. R., 1989, Image Processing of Thermal Infrared Images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, No. 9, p. 1311-1321.

2001년 2월 7일 원고접수

2001년 3월 26일 원고채택