

## 해수침투 저감을 위한 균열암반 대수층 내 담수주입시험

신재현<sup>1,2\*</sup> · 변중무<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부, <sup>2</sup>한양대학교 자원환경공학과

### Fresh Water Injection Test in a Fractured Bedrock Aquifer for the Mitigation of Seawater Intrusion

Jehyun Shin<sup>1,2\*</sup> and Joongmoo Byun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

<sup>2</sup>Department of Natural resources and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Fresh water injection test in a fractured bedrock aquifer was applied as an efficient approach to lower saline concentrations in the saltwater-freshwater transition zone formed by seawater intrusion in a coastal area. The methodology and effectiveness of fresh water injection for hydraulically controlling seawater intrusion is overwhelmingly site dependent, and there is an urgent need to characterize the permeable fractures or unconsolidated porous formations which can allow for seawater flow and transport. Considering aquifer characteristics, injection and monitoring boreholes were optimally designed and completed to inject fresh water through sand layer and fractured bedrock, respectively. We devised and used the injection system using double packer for easy field operation and maintenance. Overall fracture distribution was systematically identified from borehole image logs, and the section of fresh water injection was decided from injection test and monitoring. With fresh water injection, the fluid electrical conductivity of the monitoring well started to be lowered by the inflow of fresh water at the specific depth. And this inflow led to the replacement of the fluid in the upper parts of the borehole with fresh water. Furthermore, the injection effect lasted more than several months, which means that fresh water injection may contribute to the mitigation of seawater intrusion in a coastal area.

**Key words :** fresh water injection, seawater intrusion, permeable fracture, borehole image logs

연안지역 염수와 담수가 혼재하는 전이대에서 해수침투 피해개선을 목적으로 균열암반을 통한 담수주입시험을 수행하고 그 효과를 모니터링하였다. 담수주입은 절대적으로 그 지역의 지질학적, 수리학적 특성에 따라 좌우되며, 특히 파쇄대나 투수성 미고결 지층 등의 특성 파악이 중요하다. 연구 지역의 염담수 분포특성을 고려하여 두 개의 주요 연안 대수층인 층적층과 균열암반 구간을 통한 담수주입이 가능하도록 시추공을 설계 및 굴착하였으며, 균열암반 대수층 내 담수주입을 위하여 현장에서의 시험 준비, 이동, 조립 및 장비의 유지보수가 간단하도록 착탈식인 모듈화되어 있는 주입시스템을 제작하여 적용하였다. 시추공영상화검층을 통해 전체적인 균열의 특성을 파악하였고, 이를 바탕으로 주입공 및 관측공 간 투수성 파쇄대의 확인을 위한 구간별 담수주입 및 모니터링을 실시하여 담수주입 구간을 선정하였다. 담수주입시험 결과, 관측공의 일정 심도에서 담수가 유입되어 시간이 경과함에 따라 상부 구간의 전기전도도도 점진적으로 감소함을 보였으며, 담수주입 중단 및 폐커를 해지한 후에도 유입된 심도에서 점진적으로 전기전도도값이 증가하기는 하지만 그 증가폭이 전체적으로 낮아 담수주입의 효과가 있음을 확인하였다. 또한 장기적으로 전기전도도값을 모니터링함으로써 담수주입의 효과가 수개월 후에도 지속됨을 확인하였으며, 이는 담수주입에 의해 일정 정도의 해수침투 피해에 대한 개선효과를 기대할 수 있음을 시사한다.

**주요어 :** 담수주입, 해수침투, 투수성 파쇄대, 시추공영상화검층

\*Corresponding author: jehyun@kigam.re.kr

## 1. 서 론

연안지역에서 발생하는 해수침투에 대한 연구의 궁극적인 목적은 해수침투의 확산을 최소화하면서 지속 가능한 연안 지하수를 확보하는데 있다. 국내 서·남해 연안지역은 내륙 수 km까지도 해수침투의 영향으로 고염분 지하수가 분포하여 지하수 개발에 많은 어려움을 겪고 있다(Hwang *et al.*, 2003). 해수침투 피해를 저감하기 위한 일반적인 방법으로는 연안지역에서의 염·담수 영역을 고려하여 양수량을 최적화하는 방법이 있으며, 다른 방법으로는 인공적으로 담수를 대수층에 주입시켜서 지하수위를 높이고 수리적으로 해수의 이동을 제어하는 방법이 있다. 미국 캘리포니아, 플로리다 및 워싱턴 등의 연안지역에는 해수침투장벽시추공(salt water intrusion barrier well)을 구축하여 해수침투를 방지하고 있으며(USEPA, 1999), 미국 대서양의 경우, ASR(Aquifer Storage and Recovery) system을 이용하여 강수량이 충분한 시기에 지하수를 주입하여 해수침투 확산을 방지하고 건기(dry season)에 이를 양수하여 이용하기도 한다(Pyne, 1995). 연안지역에서의 담수주입은 절대적으로 그 지역의 지질학적, 수리학적 특성에 따라 좌우되며, 특히 파쇄대나 투수성 미고결 지층 등의 특성 파악이 중요하다. 나공(open hole)인 경우, 시추공영상화검층(borehole image logs) 및 공경검층(caliper logs) 등에서 파쇄대 분포 특성을 파악한 후 지하수 유동과 관련된 파쇄대 확인을 위해 패커(packer)시험 또는 유향·유속검층(borehole flow logs)을 적용할 수 있고(Cohen *et al.*, 1996; Paillet, 2001; Williams and Johnson, 2004; Kim *et al.*, 2005), 전 구간 스크린(screen)을 설치한 케이싱(casing)이 삽입되어 있는 경우는 공내수 치환기법을 적용한 전기전도도 검층을 실시하기도 한다(Hwang *et al.*, 2006).

본 연구는 전남 영광군 백수읍 일대 해수침투 정밀 연구지역에 해수침투 피해개선 효과 확인을 목적으로 염·담수 경계지역에서 담수주입시험을 수행하고 그 효과를 모니터링하였다. 본 연구지역은 고분해능 염·담수영역 영상화기술을 통한 염·담수 분포평가 및 다채널 전기전도도 모니터링을 이용한 염수 유입구간 파악 등 해수침투 피해 저감화 연구가 수행되어 왔던 곳으로, 기존의 연구결과 연구지역의 고염분 지하수 유동은 충적층 및 균열암반 등 두 개의 큰 대수층을 통해 이루어짐을 확인할 수 있었다(Shin *et al.*, 2005). 이에 염수지역에서의 충적층을 통한 담수주입시험을 실시하고 다양한 물리탐사적 기법(물리검층, 다채널 전기

전도도 모니터링, 전기비저항탐사, 자연전위 모니터링 등)을 이용하여 담수주입 효과를 확인한 바 있으며(Park *et al.*, 2007), 본 논문에서는 염수와 담수가 혼재하는 전이대(transition zone)에서 균열암반을 통한 담수주입시험 및 모니터링 결과에 대하여 기술하였다.

## 2. 연구지역 및 담수주입공의 설계

해수침투 개선효과 확인을 위한 담수주입시험이 적용된 지역은 전남 영광군 백수읍 일대로(Fig. 1a), 본 지역은 다양한 조사와 연구를 통해 개발된 해수침투대 등가염분농도 추정기술을 이용하여 염·담수 분포를 해석한 바 있어 염·담수 경계가 형성된 것으로 추정되는 전이대 지역이다(Hwang *et al.*, 2004). Fig. 1b는 장기양수 및 담수주입시험을 목적으로 염담수 분포특성을 고려하여 굴착한 시추공의 위치도이며 각 시추공은 남·북 방향으로 위치한다. 심부 지질은 심도 15m까지 점토층, 약 23m까지 사질층, 하부로 기반암이 분포해 있으며, 중성자검층(Neutron logging) 결과 사질층의 공극률은 평균 약 30 LPU(Limestone Porosity Unit), 기반암의 공극률은 약 5 LPU를 나타내었다. 장기양수 중에 시행한 다채널 전기전도도 모니터링, 공내수 치환 전기전도도검층 및 유향·유속검층의 결과, 본 지역은 다수의 투수성 파쇄대와 대수층이 존재하며 염도가 낮지만 수리전도도가 큰 것으로 판단되는 사질층과 염도가 높으나 수리전도도가 사질층에 비하여 작은 것으로 판단되는 암반층의 균열이 확인되었다(Hwang *et al.*, 2008). 이에 담수주입 및 모니터링을 위한 시추공을 충적층을 통한 담수주입과 균열암반을 통한 담수주입이 가능하도록 각각 설계·굴착하였다. Fig. 2는 연안 대수층의 특성을 고려한 주입공(injection borehole) 및 관측공(monitored borehole)의 일부 단면도로써, 각 시추공의 굴착외경은 3인치이고 지하수위는 약 3.30m이다. YK-23호공과 YK-25호공은 균열암반을 통한 담수주입시험을 위하여 50m까지 굴착하였으며 사질층 하부(기반암 상부)까지 스틸(steel) 케이싱이 설치되어 있고 하부는 나공이다. YK-21호공의 굴착 심도는 50m이고 지하수 유동이 원활하도록 전 구간 스크린이 설치된 내경 50mm의 PVC 케이싱이 삽입되어있으며, YK-22호공은 충적층을 통한 담수주입시험을 위해서 21m까지 굴착되어 있으며 사질층 구간인 16~21m 만 스크린을 설치하였다(Table 1). 이는 이 지역의 주요 연안 대수층인 충적층과 균열암반 구간을 통한 담수주입시험 효과를 각각 검토하기

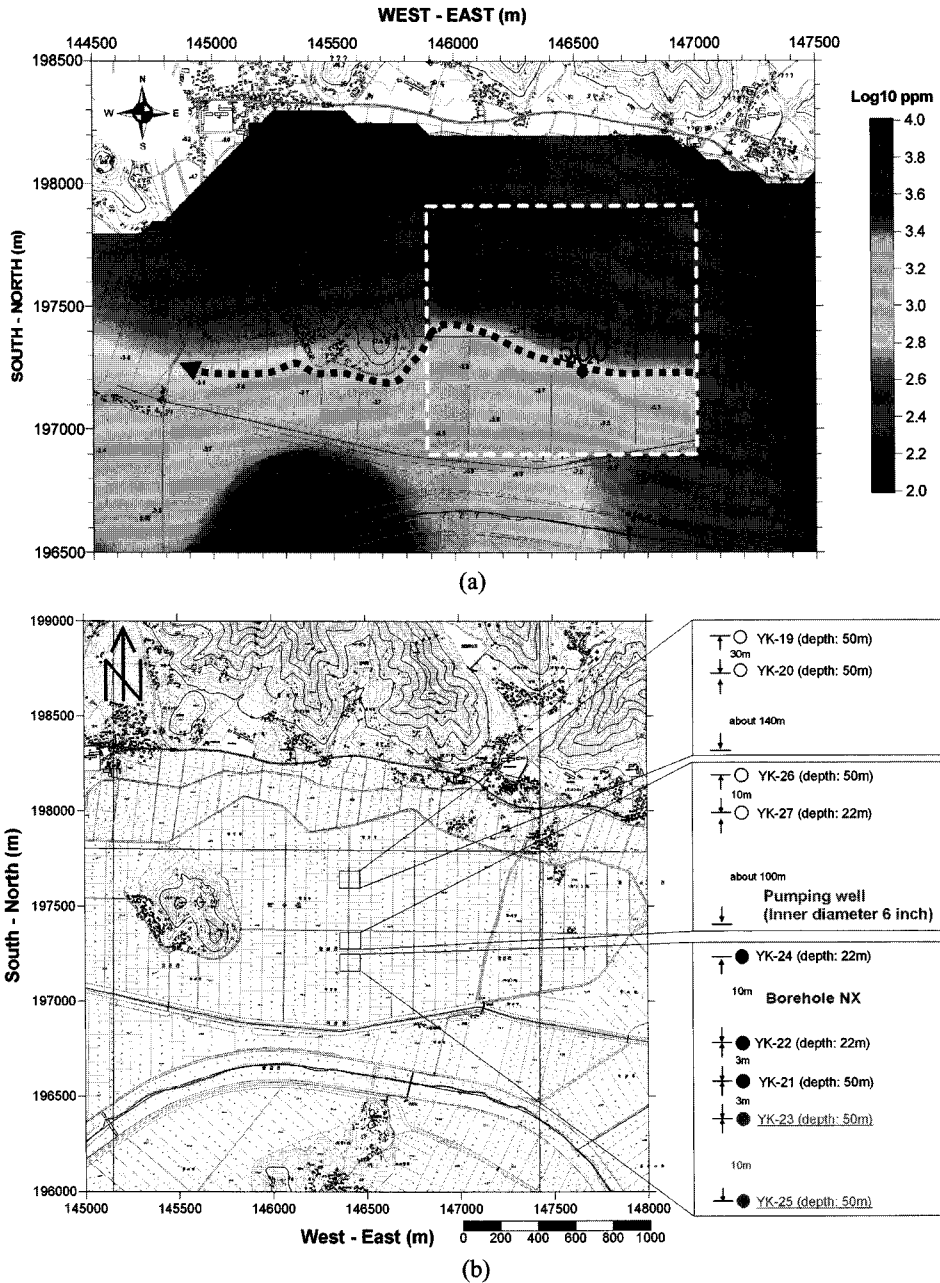


Fig. 1. Location map of the boreholes in Baeksu-eup, Yeonggwang-gun, the western seashore of Korea. (a) Distribution map of estimated equivalent NaCl concentration (Hwang *et al.*, 2004) and (b) Borehole locations for fresh water injection and pumping tests.

위함이다.

### 3. 담수주입시스템

담수주입 방법은 지하수 분야에서 암반구간의 수리

특성 파악에 주로 이용하는 패커를 이용한 주입법이다. 기존의 패커를 이용한 주입장비는 통상적으로 시추와 동시에 주입시험을 수행하기 때문에 장비의 구성이 크고 규격화가 부족하는데 본 시스템은 이와 같은 사항을 보완하여 현장에서의 시험 준비, 이동, 조립 및 장비의

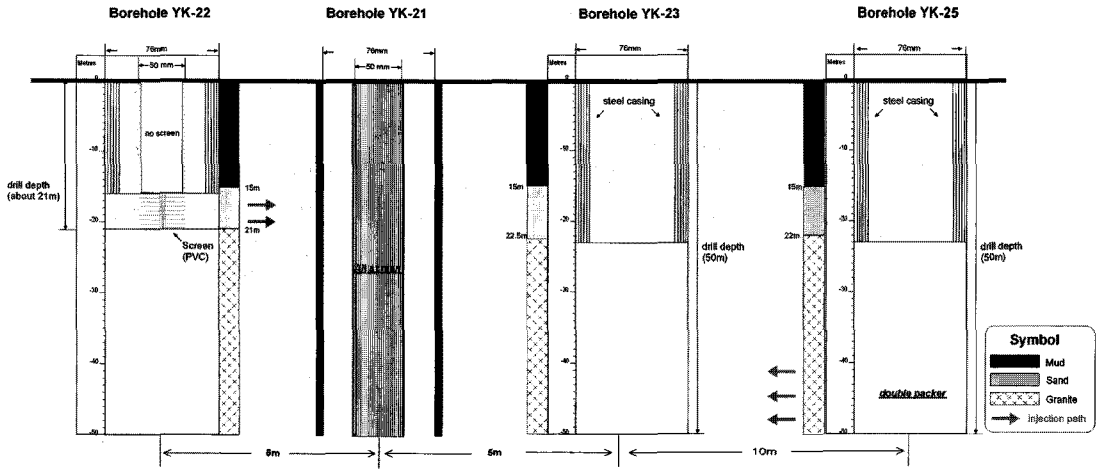


Fig. 2. The cross-sectional view of boreholes for fresh water injection tests in the coastal area. Borehole YK-21 is cased and fully slotted to the final drilling depth for the observation of fluid flow and three boreholes have been specially designed for injecting fresh water through sand layer and fractured bedrock (YK-22, YK-23, and YK-25).

Table 1. Details of the injection and monitoring boreholes

Borehole No.	Diameter (mm)	Drilling Depth (GL. m)	Casing		Groundwater Level (GL. m)
			Material	Casing Depth (GL. m)	
YK- 21	NX (Φ76)	50	PVC with screen	All	3.34
YK- 22	NX (Φ76)	21	PVC with screen	All/16-21 m (screen)	3.32
YK- 23	NX (Φ76)	50	Steel	0-23 m	3.30
YK- 25	NX (Φ76)	50	Steel	0-22 m	3.30

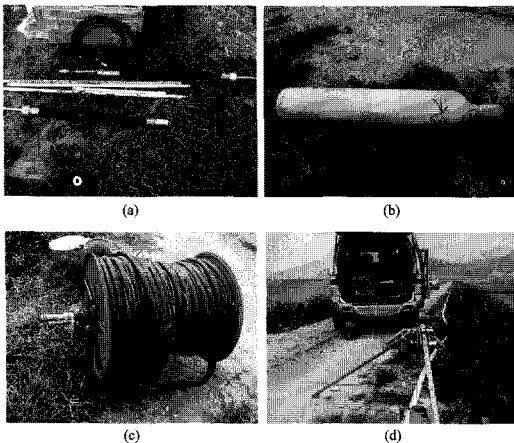


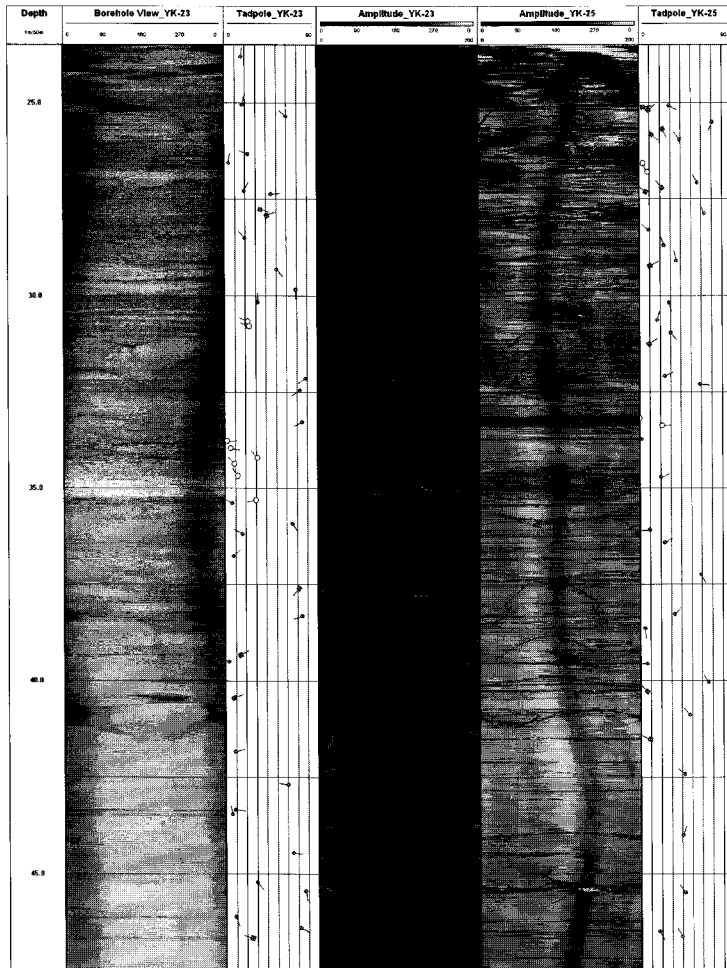
Fig. 3. The fresh water injection and monitoring system. (a) The packer modules, (b) The container of nitrogen gas for the expansion of packer, (c) Injection hose, and (d) Temperature/fluid electrical conductivity logging equipments for monitoring.

유지보수가 간단하도록 제작되었다. 담수주입시스템은 Fig. 3과 같으며 패커 모듈의 길이는 1.2 m, 패커길이

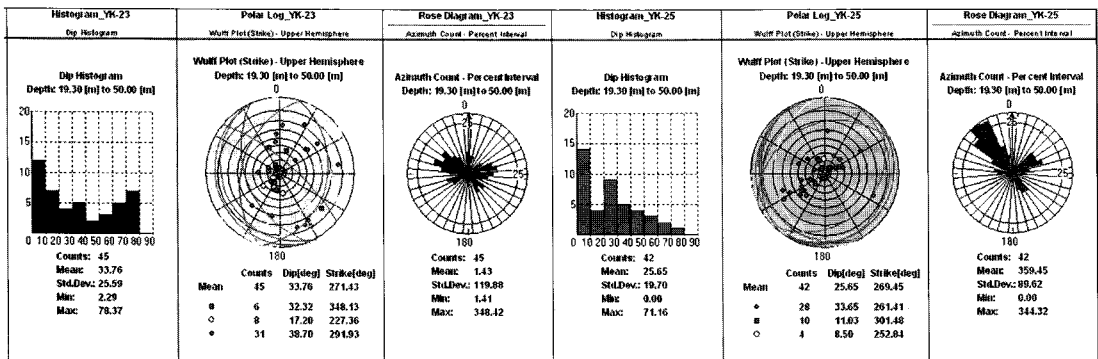
Table 2. The fresh water injection system

Module	Length (m)	Diameter (mm)	Maximum Pressure (kbar)
Packer	1.2	45-130	10
Injection hose	100	20	22
Inflation hose	100	8	22

는 700 mm, 직경은 45 mm, 팽창 가능한 최대 직경은 약 130 mm, 최대 압력은 10 kbar이다. 주입호수는 패커 팽창용 호스 및 패커의 무게를 지지하기 위한 강선과 함께 릴(reel)에 감겨있으며 주입호수의 직경은 20 mm이고 최대 압력은 22 kbar이다. 패커의 팽창은 공기, 유체 등을 이용하며 패커 팽창용 호스의 직경은 8 mm이고 최대 압력은 22 kbar이다. 담수주입 구간은 파쇄대의 특성에 따라서 조절이 가능하며 최대 구간은 3 m이다. 대부분의 연결은 착탈식과 단위 부분의 고장 시 교환이 쉽도록 모듈화 되어있어 현장에서 빠른 시간 내에 조립이 가능하도록 제작하였다. 시험 가능한 심도는 최대 100 m이며 적용 대상 시추공의 공경은 3 인치이다(Table 2).



(a)



(b)

Fig. 4. Fracture detection and evaluation for the understanding of the fracture distribution and characteristics. (a) The magnetically oriented amplitude images of borehole wall from acoustic and optical televiewer in boreholes YK-23 and YK-25 and (b) Fully interactive structure interpretation including histograms of fracture dip versus frequency for entire fracture population, stereographic projections, and rose diagrams of fracture orientation.

4. 균열암반 내 담수주입 구간 선정

담수주입시험에 앞서서 전체적인 균열 특성 및 주입 구간 선정을 위하여 관측공 YK-23과 주입공 YK-25에 대해 시추공영상화검층을 수행하였다. 기반암의 균열 파악을 위해 기반암 심도 22 m 하부로 광학텔레뷰어(optical televiwer)와 초음파주사검층(acoustic televiwer)를 실시하였는데, 광학텔레뷰어의 경우 시추공벽 상태는 잘 보여주나 절리 및 파쇄대의 주향(strike) 및 경사(dip) 해석을 위한 피킹(picking)작업에는 분해능이 떨어져 초음파주사검층 자료를 사용하였다. 그 결과, 공경검층 자료로는 파악할 수 없는 시추공과 교차하는 많은 절리와 파쇄대의 분포를 알 수 있었으며, 주어진 심도구간에서 YK-23호공은 총 45개 절리(평균 주향 271.43/경사각 33.76), YK-25호공은 총 42개의 절리(평균 주향 269.45/경사각 25.65)의 특징을 보였다(Fig. 4). 본 시험에서 관측공으로 이용 할 YK-23호공의 경우,

심도 30~40 m에 북서 방향으로 절리와 파쇄대가 분포하며 40 m 하부에는 남동 방향의 많은 절리들을 확인할 수 있다. 특히, 심도 35 m 부근에 최대 1m의 큰 파쇄대들이 분포해 있으며 북서 방향의 주향과 30° 이내의 경사를 보이고 있다. YK-25호공의 절리 및 파쇄대는 전체적으로 낮은 경사각을 보이고 있으며, 절리의 주향 및 경사 해석자료로부터 심도 32~35 m의 큰 파쇄대 및 39~42 m 와 44~47 m에서의 발달된 균열대에서 두 시추공 사이에 연결성이 있을 가능성이 확인되었다. 이들 세 구간에 대하여 담수주입 및 모니터링을 실시하여 주입공 및 관측공 간 투수성 파쇄대의 확인을 하고자 하였다. YK-25호공의 선정된 각 심도에 제작된 담수주입시스템을 사용하여 담수를 주입하면서 YK-23호공에서 시간 별로 전기전도도검층을 사용하여 모니터링을 실시하였다. 담수주입 전 공내수의 초기 전기전도도도 값은 30 m 상부에서는 약 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 35 m 하부에는 약 3,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이었으며, 심도 44~47 m에

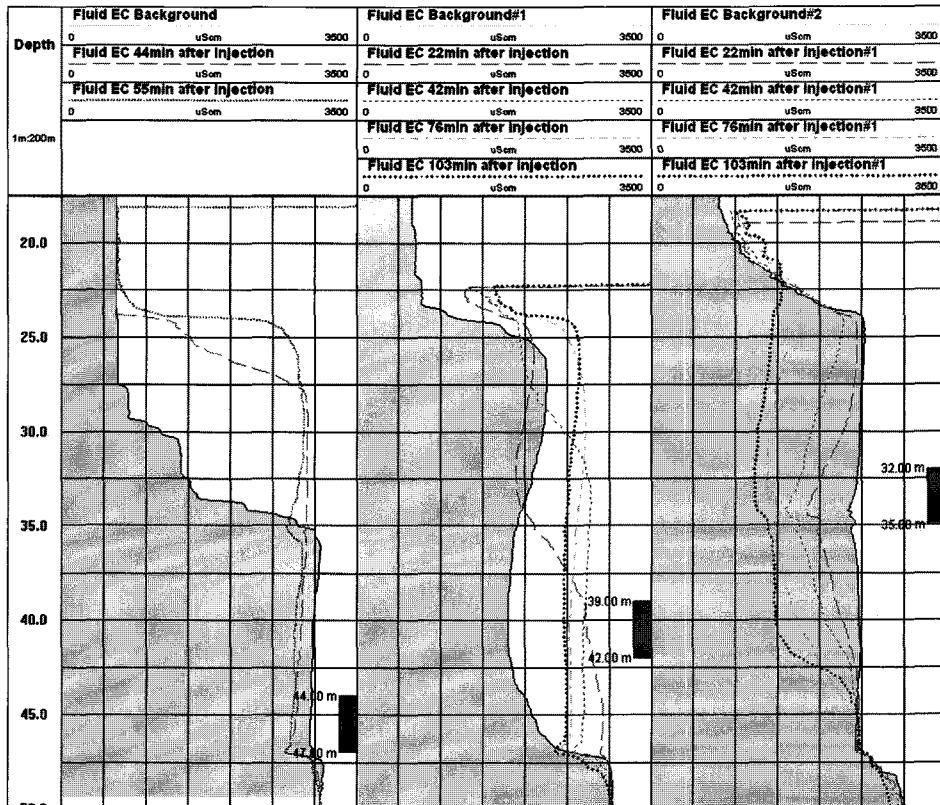


Fig. 5. Fresh water injection test for the determination of fresh water injection section. It delineates the profiles of fluid electrical conductivity in monitoring borehole YK-23 while injecting fresh water into the injection borehole YK-25 at each depth of 44~47 m, 39~42 m, and 32~35 m.

서 주입 시 YK-23호공의 약 46 m의 심도에서 담수가 유입되기 시작하여 시간이 경과함에 따라 전기전도도도가 점진적으로 감소함을 보였다. 한편 심도 39~42 m에서의 담수주입은 효과를 얻을 수 없었으며, 심도 32~35 m에서 주입 시에는 YK-23호공의 심도 34 m에 분포하는 큰 파쇄대를 따라 담수가 유입되었는데 담수 주입 1시간 40분 경과 후 1,250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지의 전기전도도도 감소치를 보였다(Fig. 5). 구간별 담수주입 결과, YK-25호공의 심도 32~35 m에서 담수를 주입할 경우 YK-23호공의 전기전도도도가 크게 감소는 하지만 심도 45 m 하부에서는 주입효과를 보이지 않으므로, 최종적으로 심도 44~47 m를 담수주입 구간으로 선정하였다. 이는 일정양수 조건에서 적합한 유향유속검층으로 확인된 YK-25호공의 투수성 파쇄대 위치와 일치하였다 (Hwang *et al.*, 2008).

### 5. 담수주입 및 모니터링

담수 주입공으로 사용된 시추공은 YK-25호공이며 이 시추공에서 10 m 떨어진 YK-23호공에서 전기전도도도검층기와 시판용 장비인 전기전도도, 온도 및 수위를 측정할 수 있는 CTD(Conductivity, Temperature, and Depth)-diver를 이용하여 주입효과를 모니터링하였다. 주입수는 주입공에서 북쪽 방향으로 약 400 m 떨어진 담수영역에 위치한 YK-19호공의 지하수를 사용하였으며, 전기전도도는 264  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (18.3°C)로써 이는 주입공 및 관측공 전기전도도와 비교할 때 약 1/10 수준이다. 담수주입 전에 각 시추공에서 전기전도도검층을 수행하여 담수 주입의 효과를 확인하기 위한 배경치 자료를 취득하였다. 담수주입 구간은 44~47 m이고, 담수 주입은 약 17시간 동안 수행하였으며 총 주입량은 15.4톤으로 분당 평균 주입량은 15 l/min이다. 전기전도도검층은 30분 간격으로 연속적으로 측정하였으며 담수주입의 지속성을 보기 위하여 주입을 멈춘 후에도 일정 시간 모니터링을 실시하였다. Fig. 6은 YK-23호공에서의 모니터링 결과로 주입 초기 시간대에 심도 34 m 상부에서 초기치보다 약 1,200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도 증가한 최대 2,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 까지 전기전도도값을 보이다가 점차 감소한다. 이는 하부 심도로부터 담수가 주입되면서 하부에 위치하였던 전기전도도가 높은 지하수가 시추공 상부로 올라가면서 형성되는 현상으로 보인다. 담수주입이 시작한 후 30분경과 시점부터 하부를 시작으로 전기전도도값이 감소함을 보이며, 특히 약 46 m의 심도에서 담수가 유입되어 시추공 상부로 점진적으로 치

환되는 것을 알 수 있다. 이는 YK-23호공의 시추공영상화검층의 자료로부터 심도 46 m의 암반의 균열을 통하여 유입되는 것을 확인 할 수 있었다. 이후 담수주입이 계속됨에 따라서 변화의 폭이 작아지기는 하지만 전기전도도값이 계속 감소하였으며, 약 17시간 동안 담수 주입 후 시추공 하부의 전기전도도값은 약 560  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 초기 배경치보다 2,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  정도 감소하였다. 담수주입 중단 및 YK-25호공의 패커를 해지한 후에도 유입된 심도에서 점진적으로 전기전도도값이 증가하기는 하지만 그 증가폭이 전체적으로 낮아 균열암반을 통한 담수주입이 효과적임을 확인하였다. 또한 담수주입의 지속성을 보기 위하여 장기적으로 전기전도도값을 모니터링 한 결과, 담수주입 한달 반 및 5개월 경과 후 하부 심도에서의 전기전도도값의 증가를 보이지만 상부구간은 약 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 담수주입의 효과가 수개월 후에도 지속됨을 확인할 수 있었다(Fig. 7).

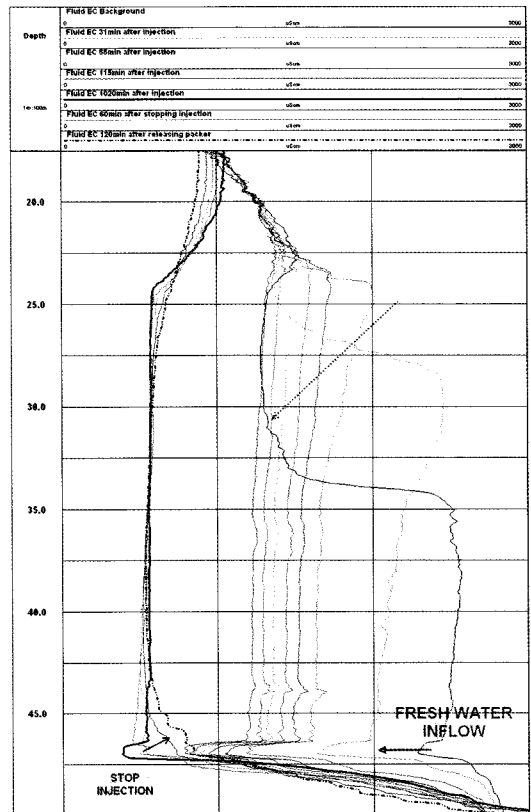


Fig. 6. Monitoring results for the fresh water injection in a fractured bedrock aquifer. The logs indicate that fresh water flows into the well at a depth of about 46 m and displaces the more conductive water. Bold red arrow denotes the depth of fresh water inflow.

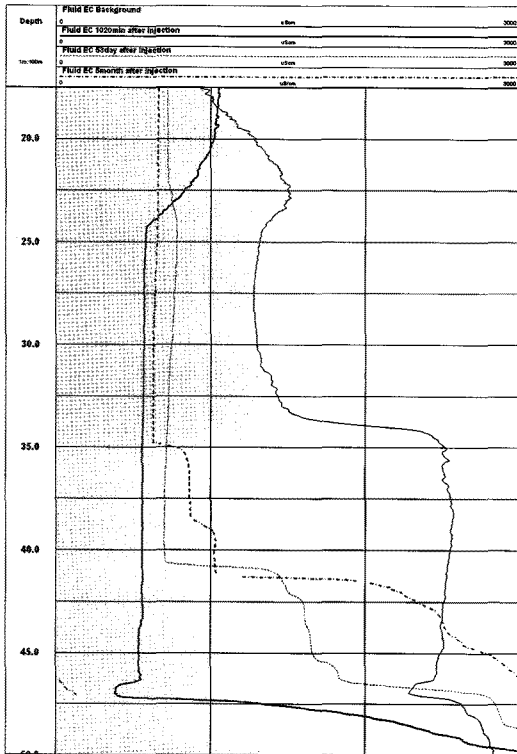


Fig. 7. Long-term monitoring results to evaluate the effect of the fresh water injection in a fractured bedrock aquifer. Injection effect lasts more than several months, which means that fresh water injection may contribute to the mitigation of seawater intrusion in a coastal area.

## 6. 결 론

연안지역 염수와 담수가 혼재하는 전이대에서 담수 주입에 의한 해수침투 피해개선 효과확인을 목적으로 담수주입시험을 수행하고 그 결과를 모니터링하였다. 기존의 연구로부터 본 지역은 다수의 투수성 파쇄대와 대수층이 존재하여 사질층과 암반의 파쇄대를 통해 고 염분 지하수가 유입되는 것이 확인되었다. 이에 염담수 분포특성을 고려하여 총적층과 균열암반 구간을 통한 담수주입이 가능하도록 시추공을 굴착하였으며 균열암반 대수층 내 담수주입을 위한 주입시스템을 제작하여 적용하였다. 시추공영상화검층을 실시하여 시추공과 교차하는 절리와 파쇄대의 분포를 확인하였으며, 이를 바탕으로 구간별 담수주입 및 모니터링을 실시하여 담수주입 구간을 선정하였다. 담수주입시험 결과, YK-23호공의 약 46 m의 심도에서 담수가 유입되어 시간이 경과함에 따라 상부 구간의 전기전도도가 점진적으로 감소함을 보였다. 또한 담수주입의 중단 및 패커를 해

지한 후 장기간 모니터링을 한 결과, 유입된 심도에서 점진적으로 전기전도도값이 증가하기는 하지만 그 증가폭이 전체적으로 낮고 주입효과가 수개월 동안 지속됨을 확인하여 균열암반을 통한 담수주입이 효과적임을 알 수 있었다. 담수주입은 대수층의 염분도 분포를 고려하여 수행하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단된다. 즉 미고결지층인 사질층 대수층의 염분도와 균열암반 대수층의 염분도 분포를 고려하여 염-담수 경계면에서 담수주입을 수행하는 것이 가장 효율적인 것으로 보인다. 담수주입의 지속효과가 지역의 지질학적 수리학적 특성, 해수침투 정도, 지하수개발 및 이용 여부 등에 따라 달라질 것임에도 불구하고 본 연구결과와 같이 담수주입에 의해 주입정 주변에서 일정 기간 해수침투 피해에 대한 개선효과를 기대할 수 있음을 시사한다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기관고유사업인 '지구환경변화 대응 지하수 확보 통합솔루션 개발(10-3414)'의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Cohen, A.J.B., Karasaki, K., Benson, S., Bodvarsson, G., Freifeld, B., Benito, P., Cook, P., Clyde, J., Grossenbacher, K., Peterson, J., Solbau, R., Thapa, B., Vasco, D. and Zawislanski, P. (1996) Hydrogeologic characterization of fractured rock formations: A guide for groundwater remediations. United States Environmental Protection Agency, EPA/600/S-96/001, p.4-5.
- Hwang, S., Oh, H. and Song, M.-Y., (2008) Heat-pulse flowmeter test to characterize seawater intrusion in fractured rock, Yeonggwang area. Geosystem Engineering, v.45, p.1-14.
- Hwang, S., Park, Y., Shin, J. and Park, K.G. (2006) Detection of inflow permeable zones using fluid replacement conductivity logging in coastal aquifer. Geophysical Exploration, v.9, p.225-230.
- Hwang, S., Shin, J., Park, I. and Lee, S. (2004) Assessment of seawater intrusion using geophysical well logging and electrical soundings in a coastal aquifer, Youngkwang-gun, Korea. Exploration Geophysics, v.35, p.99-104.
- Hwang, S., Yun, S.T., Park, I., Shin, J., Shin, K.S. and Lee, S. (2003) Investigation for regional saltwater intrusion of western and southern coastal area in South Korea (Abstract). Proceedings of 80<sup>th</sup> Meeting of the Korean Society for Geosystem Engineering, 413p.
- Kim, Y., Kim, T., Kim, K.Y., Hwang, S. and Chae, B.G. (2005) Analysis of groundwater flow characterization in fractured aquifer system. The Journal of Korean



- Society of Soil and Groundwater Environment, v.10, p.33-44.
- Paillet, F.L. (2001) Hydraulic head applications of flow logs in the study of heterogeneous aquifers. *Ground Water*, v.39, p.667-675.
- Park, K.G., Shin, J., Hwang, S. and Park, I. (2007) Fresh water injection test to mitigate seawater intrusion and geophysical monitoring in coastal area. *Geophysical Exploration*, v.10, p.353-360.
- Pyne, R.D.G. (1995) *Groundwater recharge and wells: a guide to aquifer storage recovery*. Lewis Publishers, 376p.
- Shin, J., Hwang, S., Park, K.G., Park, Y. and Byun, J. (2005) The development of multi-channel electrical conductivity monitoring system and its application in the coastal aquifer. *Geophysical Exploration*, v.8, p.156-162.
- USEPA (1999) Salt water intrusion barrier wells. United States Environmental Protection Agency, EPA/816-R-99-014t, p.22-27.
- Williams, J.H. and Johnson, C.D. (2004) Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, v.55, p.151-159.

---

2010년 7월 23일 원고접수, 2010년 8월 20일 게재승인