

제주 현무암 지역의 용암분출에 따른 물리검층 반응의 특성 고찰

황세호¹⁾, 신제현¹⁾, 박인화²⁾, 최선영¹⁾, 박기화²⁾, 고기원³⁾

Geophysical well logs in basaltic area, Jeju Island

Seho Hwang¹⁾, Jehyun Shin¹⁾, Inhwa Park¹⁾, Sun Young Choi¹⁾, Ki Hwa Park²⁾ and Gi Won Koh³⁾

요약: 현무암으로 구성된 제주도에서 다양한 물리검층 수행하여 용암분출에 따른 물성변화 특성 및 동부지역에서 광범위한 해수침투대의 특성을 파악하고자 하였다. 제주도는 해안가를 따라서 해수침투 관측망을 구축, 운영하고 있으며 지하수자원의 평가와 이와 관련된 지질특성 파악 목적으로 다양한 조사와 모니터링을 수행하고 있다. 제주도의 29개 해수침투 관측정에서 방사능검층(자연감마선, 중성자검층 및 감마-감마(밀도)검층), 전기검층, 공경검층, 공내수의 온도/전기전도도검층, 유향유속검층 등을 수행하였다. 포화대 구간에 대한 물리검층 자료는 현무암 지질 특성을 잘 반영하였으며 일관성 있는 결과를 나타냈다. 자연감마선검층은 포화/불포화대 구간에 관계없이 퇴적층, 미고결 U층, 서귀포층에서 높은 값을 보였으며 중성자검층은 용암의 분출과 관련된 특성 파악에 효과적이었다. 수중화산쇄설성퇴적층은 높은 공극률, 낮은 전기비저항을 나타내며 주요 지하수의 유동통로로 해석되었다. 침상현무암은 높은 전기비저항과 넓은 범위의 공극률을 보이고 퇴적층과 U층은 낮은 전기비저항, 높은 공극률을 보인다. 동부지역의 온도검층 자료는 수문학적인 해석이 유용하며 수산지역의 해수침투 특성의 해석에도 이용되었다.

주요어: 물리검층, 현무암의 물성, 해수침투

Abstract: Jeju Island is mainly composed of basaltic lava flows and subordinate amounts of volcanoclastic sedimentary rocks. Jeju Province operates the monitoring wells for seawater intrusion problems around Jeju Island to evaluate of groundwater resources in coastal area. Various surveys and monitoring have been performed in boreholes, and also conventional geophysical well loggings conducted to identify basalt sequences and assess seawater intrusion problems. Various conventional geophysical well logs, including radioactive logs, electrical log, caliper log, and temperature and conductivity log and heat-pulse flowmeter log were obtained in 29 boreholes. The results of geophysical well loggings for saturated rocks are interesting and consistent. Natural gamma logs are useful in basalt sequences to sedimentary interbeds, unconsolidated U formation, and seoguiipo formation with higher natural gamma log regardless of saturated or unsaturated basalts. Neutron logs are very effective to discriminate among individual lava flows, flow breaks, and sedimentary interbeds in saturated formation. In hyalocastite, porosity is high and resistivity is low, and we think that hyalocastite is a major pathway of fluid flow. In trachybasalt, porosity has a wide range and resistivity is high. In sedimentary interbeds, unconsolidated U formation and seoguiipo formation, porosity is high and resistivity is low. The temperature logs in eastern area in Jeju are useful to interpret the hydrogeological unit and evaluate seawater intrusion in Suan area.

Keywords: geophysical well logs, physical properties of basalt, seawater intrusion

1) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부(Geological & Environmental Hazards Division, KIGAM)

E-mail: hwangse@kigam.re.kr

2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부(Groundwater & Geothermal Resources Division, KIGAM)

3) 제주도광역수자원본부 수자원연구실(Jeju Provincial water resources management office)

1. 서론

현무암으로 구성된 제주도에서 용암분출에 따른 물리검층 반응특성 해석과 동부지역에서 발생하는 해수침투 현상을 파악하기 위하여 다양한 물리검층을 수행하였다. 물리검층은 석유탐사 분야에서 개발·이용되어 왔으나 최근에는 지반조사, 지하자원 및 지열자원평가, 지하수조사 또는 환경오염조사 분야 등에서 다양하게 이용되고 있다. 국내에서 수행하는 물리검층은 주로 지반조사나 자원평가 및 환경오염조사 등에 관련된 것으로 화산암으로 구성된 제주도에서 다양한 물리검층을 수행한 사례는 없다. 현무암 지역에서의 물리검층 국외 사례는 Crosby and Anderson (1971), Goldberg (1997), Becker *et al.* (1989), Buckley and Oliver (1990), Versey and Singh (1982), Brewer *et al.* (1989) 등이 있으며 주로 일반적인 물리검층의 적용성 검토, 포화대/불포화대에서의 물리검층 등이며 전반적으로 규모가 큰 지역인 인도의 Deccan Trap, 보츠와나의 Karoo 현무암, 하와이 등에서의 물리검층 결과이다. Helm-Clark *et al.* (2004)는 최근까지 현무암 지역에서 수행된 물리검층 결과를 수집·분석하여 각 물리검층법의 적용성과 한계에 대한 것을 발표하기도 하였다. 기존의 연구는 용암분출의 규모가 크기 때문에 각 시추공에서의 물리검층 반응을 이용한 수평적인 연결성 파악에 많은 관심을 가졌다는 점이다. 제주도 현무암 지역에서의 물리검층은 Helm-Clark *et al.* (2004)에서 강조한 것처럼 제주도 지질의 특이성에 대한 이해의 폭이 물리검층 자료의 해석에 매우 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 제주도 지질에 대한 소개, 현무암 지역에서 물리검층을 수행할 경우의 특이사항, 물리검층 자료취득 현황, 포화대를 중심으로 한 물리검층 자료 해석, 동부지역 시추공에 대한 온도검층 자료 해석과 해수침투대의 특성에 대하여 기술한다.

2. 제주의 지질 개론

제주도의 화산활동은 약 160만년 전부터 5000년 정도까지 계속되었다. 제주도가 형성되는 기간에 빙하기와 관련하여 해수면의 상승과 하강이 있었으며 용암이 해수로 유입되는 현상이 시추공의 코어에서 종종 관찰된다. 제주도는 해수면 하부 120 m부터 U층이 존재하는데 U층은 미고결 상태인 빨과 모래로 구성되었으며 시추코어에서 확인된다. U층은 제주도가 육지와 연결되었을 때의 해안가에 분포했던 퇴적층으로 황하강 또는 양자강에 이어진 삼각주 형태로 분포했던 지층으로 추정된다. 빙하기에서 해빙기로 이어지면서 해수면은 상승하였고 해수면이 높아진 시기에 용암이 분출하여 Hyaloclastite를 형성하기도 하였다. Hyaloclastite가 산출되는 수위는 그 당시의 해수면의 높이를 지시하는데 현재의 해수면 보다 5 m 높은 위치에서도 Hyaloclastite가 산출되기도 한다. Hyaloclastite 층은 왕모래 크기 또는 잔자갈 크기로 구성되어 있고 분포 면적이 넓기 때문에 지하수의 함유역할이 클 것으로 해석된다. 다음은 박기화 등 (2004)에서 제주도 지질에 대한 내용을 인용한 것이며 Fig. 1은 제주도의 지질도이다.

제주도 지질은 용암의 점성에 크게 좌우되는데 제주도에서 ‘빌레’라 하는 암석은 광활한 지역을 덮을 수 있는 pahoehoe성 용암에 의해 형성된 암석이고 ‘꽃자왈’이라 불리는 암석은 점성이 높고 낮은 온도의 aa성 용암에 의해 형성된 암석이다. 제주도 지표에 분포한 암석은 최소한 41회의 용암분출에 의해 형성되었으며 분출지는 시기마다 다르며 분출지에는 대부분이 분석구가 위치하고 있다. 지표에 분포한 분석구는 대략 350개 정도인데 이들 분석구는 대부분이 aa성 용암이 분출할 때 만들어진 것이며 분포 암석은 구성광물의 함량과 종류에 따라서 크게 6종으로 구분된다.

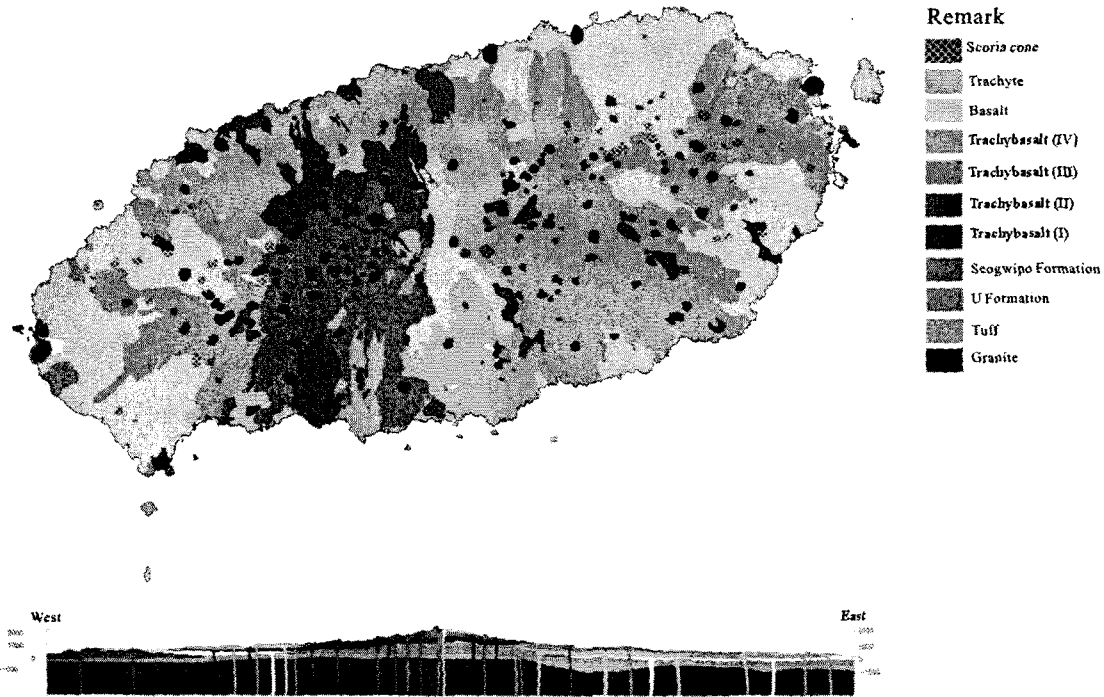


Fig. 1. Geological map of Jeju Island.

침상현무암(A): 주로 제주도 동측과 서측에 분포하며 높은 온도와 낮은 점성을 갖는 pahoehoe 성 용암에서 형성된 암석으로 다량의 기공을 갖고 있으며 표면이 매끄러운 특징이 있다. 2 mm 크기의 장석이 침상으로 나타나며 장석은 조면 구조를 보이는 것이 이 암석의 특징이다. 일반적으로 두께는 1 m 내외이나 고지형의 계곡을 채운 경우에는 두께가 수십 m가 되기도 한다. 제주도 형성기간에 5회에 걸쳐 분출하였다.

감람석현무암(W): 제주도의 동측과 서측에 분포하며 pahoehoe성과 aa성의 중간 성격을 갖는 용암에서 형성된 암석으로 근원지 부근에서는 표면이 매끄러우나 멀리 흘러가면서 aa성의 용암으로 바뀌어 많은 양의 크링커를 형성한다. 구성광물은 1 mm 크기의 감람석이 산점하는 특징이 있으며 기공은 2 cm 크기로 다소 길게 신장된 양상으로 나타난다. 부분적으로는 pahoehoe성 용암에서 형성된 침상현무암과 구분이 어려운 부분도 있다. 이 암석은 5회의 분출기로 구분된다.

장석-휘석 조면현무암(D): 대표적인 산출지는 주상절리가 잘 발달된 대포동 지역의 암석이 이에 해당된다. 제주와 서귀포 지역에 분포하며 aa성 용암에 의해 형성된 암석이다. 이 암석의 표면에는 두꺼운 크링커가 형성되어 있는데 이런 표면을 갖는 암석이 분포한 지역이 꽃자왈에 해당된다. 구성광물은 다량의 장석과 휘석이 반정으로 산점하며 장석과 휘석의 함량은 25~30% 정도이다. 이 암석은 5번의 분출기를 거치면서 형성되었다.

휘석-장석 조면현무암(M): 제주도 지표에서 가장 흔히 분포하는 암석으로 주로 제주도 동부에 분포하지만 서측에도 일부 분포한다. aa성 용암에 의해 형성된 암석으로 두꺼운 크링커를 형성한 것이 특징이다. 이 암석은 7 mm 크기의 타형 모양을 갖는 투명한 사장석과 10 mm 크기의

회석이 1 % 정도 산점하는 것이 특징이다. 이 암석은 15번 분출시기를 달리하면서 형성되었다. **회석-장석 조면현무암(S)**: 제주도 중앙부에서 서귀포 쪽으로 넓게 분포한 암석으로 aa용암에 의해 형성된 암석이다. 이 암석에는 자형의 사장석이 반정으로 25 % 정도 함유되어 있는 것이 특징이며 회석은 1~2 % 정도 함유되어 있다. 분출시기를 달리하는 6번의 분출활동에 의해 형성되었다.

조면암질암(T): 한라산 조면암, 산방산 조면암 등이 이에 속한다. 회색 내지는 담회색의 암석으로 치밀하고 쪼개짐이 발달한 것이 특징이다. 점성이 매우 높은 용암에서 형성된 것으로 한라산에서 제주와 서귀포 쪽으로 넓게 분포한다. 시기를 달리하는 4번의 분출에 의해 형성되었다.

퇴적층은 41번의 분출기 기간동안에 낮은 지형을 충전하여 쌓이기도 했는데 이 퇴적층은 당시의 좁고 긴 계곡에 국한되어 수평적인 연장성은 제한적이다. 퇴적층은 대부분이 미세한 스코리아로 구성되어 있으며 지표에 장기간 노출된 경우는 적황색의 점토로 변하기도 하였다. 퇴적층 위에 용암이 덮은 부분은 용암의 높은 열에 의해 구어지기도 하여 더 짙은 담황색으로 변해 있기도 하다. 그 이외 상산, 조천 일대에는 조개껍질로 구성된 풍성사구가 분포한다.

3. 제주도 현무암 지역에서 취득한 물리검층 자료 처리, 해석상의 특이성

현무암에서의 자연감마선은 강도가 매우 작은 편이며 하나의 지질학적 단위 내에서는 거의 동일한 범위를 갖는다. 단위 지층 사이의 높은 자연감마선은 주로 퇴적층과 관련된 것이 많으며 제주도의 경우에도 퇴적층이나 U층의 경우, 현무암에 비하여 상대적으로 높은 자연감마선을 보인다.

감마-감마(밀도) 밀도검층에서 원위치 밀도는 포화대와 불포화대 구간, 그리고 포화대의 경우 염분도를 고려해야 한다. 석유회사의 경우, 다양한 환경에 대한 교정곡선(calibration curve) 또는 보정곡선(correction curve)을 보유하고 있으나 소구경 시추공용으로 시판되는 대부분의 장비는 이와 같은 자료가 부족하여 현실적으로 정확한 보정은 어렵다. 정확한 밀도를 측정하기 위해서는 현무암 암괴를 이용한 교정장치 개발과 실내시험이 수행되어야 한다.

공내수의 전기전도도검층 자료는 상용로그를 취하여 표현하였는데 제주도 동부 해안가의 경우, 지하수 전기전도도의 범위가 50,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도로 매우 높아 전반적인 전기전도도의 변화 파악이 필요하기 때문이다. 모든 전기전도도는 25 $^{\circ}\text{C}$ 에서의 전기전도도로 환산한 것이다.

전기비저항검층 또는 전자유도검층으로 측정된 전기비저항은 포화대 공극수의 전기전도도와 공극률에 영향을 많이 받아 포화대와 불포화대, 그리고 해수침투대의 전기비저항 차이가 크며 U층이나 퇴적층 또는 수중화산쇄설성퇴적층은 낮은 전기비저항 값을 보인다. 모니터링 장비를 설치한 시추공에는 PVC 케이싱이 삽입되어 있고 연결부위에 steel의 자재를 이용했기 때문에 이들 영향에 대한 처리가 필요하다

1차원 유향-유속검층의 경우, 시추공내에서 지하수의 흐름 파악에 효과적이거나 유량 환산목적으로 지하수 흐름모음 장치(Flexible diverter)를 손테에 설치하는 경우, 케이싱내의 물때의 영향으로 측정이 어려운 점이 있어 정성적인 유향-유속의 측정만이 가능한 경우가 있다.

현무암 지역에서 중성자검층을 이용한 공극률 추정은 어려운 문제이다. 이와 같은 이유는 대부분의 장비제조사에서 제공하는 교정곡선(calibration curve) 작성 과정에 퇴적암을 이용하기 때문이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 Broglia and Ellis (1990)는 DSDP (Deep Sea Drilling

Project), Knutson *et al.* (1994)는 ODP (Ocean Drilling Project)에서 현무암 지역에서의 물리검층을 수행하면서 현무암 암괴를 이용하여 공극 calibrator를 제작하였으나 열에 의한 변질이나 점토 등의 영향으로 유효공극율과 직접적으로 관련시킬 수는 없었다. 전반적으로 현무암에서 중성자검층으로 측정된 포화도에 대한 공극률은 실제보다 과대평가되는 경향이 있는 점을 유의해야 한다. 중성자검층에서 추정하는 공극률은 석회암 공극률에 대한 상대 공극률이며 총 공극률이다. 그리고 포화대인 지하수위 하부 구간에 대한 공극률 추정만이 가능하고 염분도의 변화에 대한 특성을 고려하지 않았다.

4. 물리검층 자료취득 및 처리

제주도 현무암 지역에서 적용한 물리검층은 방사능검층인 자연감마선검층, 중성자검층, 감마-감마(밀도)검층과 전기검층 및 전자유도검층, 공경검층, 공내수의 온도 및 전기전도도검층, 그리고 1차원 유향·유속검층이다. 물리검층 시스템은 영국 Robertson Geologging사에서 제작한 Micro-logger II system과 다양한 손데, 그리고 winch 등이다. 측정간격은 기본적으로 1 cm이고 적절한 이동평균법을 적용하였으며(송운호 등(2000)의 제3장 참조) 검층의 속도는 3 m/min이나 시추공의 상태에 따라서 검층 속도를 조절하였다. 물리검층을 수행한 시추공은 Fig. 2와 같으며 해수침투 관측망 27개공, 인공함양정 2개공이다. 일부 시추공은 나공상태에서 자료취득이 가능하였으나 2003년까지 굴착한 시추공과 2004년도의 일부 시추공은 케이싱이 삽입되어 제한된 조건하에서 물리검층 자료를 취득하였다. 물리검층에서 심도의 기준은 케이싱 상단(TOC; Top Of Casing)을 기준심도로 하였다.

5. 물리검층 자료 해석

물리검층 자료의 해석은 모든 시추공에서 코아를 회수하고 이들 코아에 대한 코아로깅과 일부 실내분석 등을 수행했기 때문에 코아검층과 물리검층의 반응을 비교·분석하였으며 이와 같은 이유는 현무암 지역에서의 물리검층 자료에 대한 사례도 거의 없고 무엇보다도 현무암 지역에서 물리검층 적용성에 대한 검토가 중요하기 때문이다.

제주도에서 수행한 물리검층 중에서 자연감마선검층, 중성자검층 및 전기검층/전자유도검층이 용암분출 특성이나 지층 구분에 효과적이며 이는 Helm-Clark *et al.* (2004)의 결과와도 잘 일치한다. 감마-감마(밀도)검층이나 대자율검층, 스펙트랄자연감마선검층이 지층 구분에 보다 더 효과적이지만 현재까지 가용 가능한 장비를 적용해도 좋은 결과를 보여주고 있다. 물리검층 및 코아로깅 자료에서 코아 회수율에 따른 심도의 상하 이동, 코아의 회수가 불가능한 구간에 대한 물리검층 반응에서 나타나는 미고결지층의 확인 등이 일부 시추공에서 확인되었으나 물리검층 및 코아로깅 자료는 전반적으로 잘 일치하고 있다.

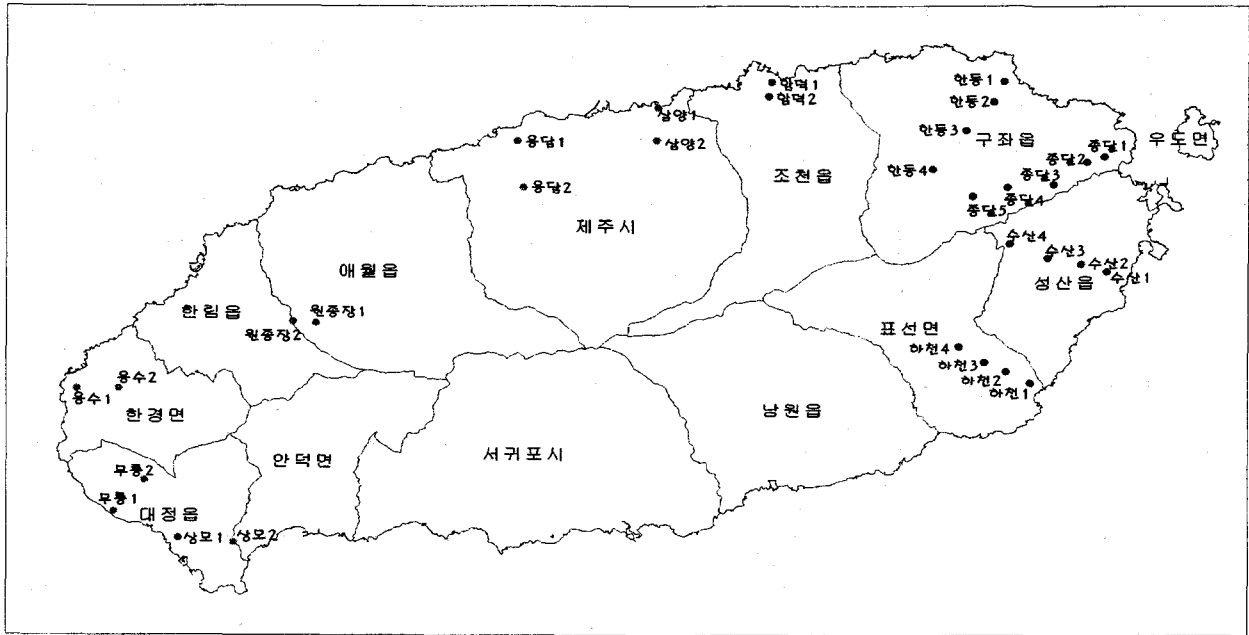


Fig. 2. Location map of borehole in Jeju Island.

(1) 포화대 구간에 대한 물리검층 자료 해석

Fig. 3은 용수-1호공(YS-1)에 대한 물리검층 결과로 침상현무암(A로 표기)과 수중화산쇄설성 퇴적층(H로 표기), 퇴적층(SE로 표기)이 잘 구분됨을 알 수 있다. 자연감마선검층의 경우, 퇴적층은 높은 감마선을 보여 쉽게 구분이 되지만 자연감마선의 변화가 작은 침상현무암이나 수중화산쇄설성퇴적층 등 현무암의 암종 구분은 어려운 것을 알 수 있다. 이는 자연감마선의 세기가 지층을 구성하고 있는 화학적 성분에 주로 좌우되기 때문이며 비슷한 화학적 성분으로 구성되면 자연감마선검층을 이용한 지층 구분은 어렵다. 중성자검층으로 추정한 공극률은 매우 복잡한 양상을 보여주고 있다. 전반적으로 침상현무암은 낮은 공극률에서 높은 공극률까지 넓은 범위를 보이며, 수중화산쇄설성퇴적층은 전반적으로 높은 공극을 보이고 있다. 침상현무암은 용암이 분출되어 이동하면서 외부와 노출된 부분은 비교적 급격하게 냉각되어 높은 공극률을 보이고 안쪽은 서서히 굳기 때문에 구조가 치밀하여 공극률이 작은 것으로 해석되며 하나의 지층 내에서 공극률의 변화는 용암의 분출 단위(횃수)를 지시하고 있다. 심도 약 20 m 하부에 존재하는 2개의 침상현무암은 공극률의 변화에서 최소 2~3회의 분출(또는 용암의 유동)이 있는 것으로 판단된다.

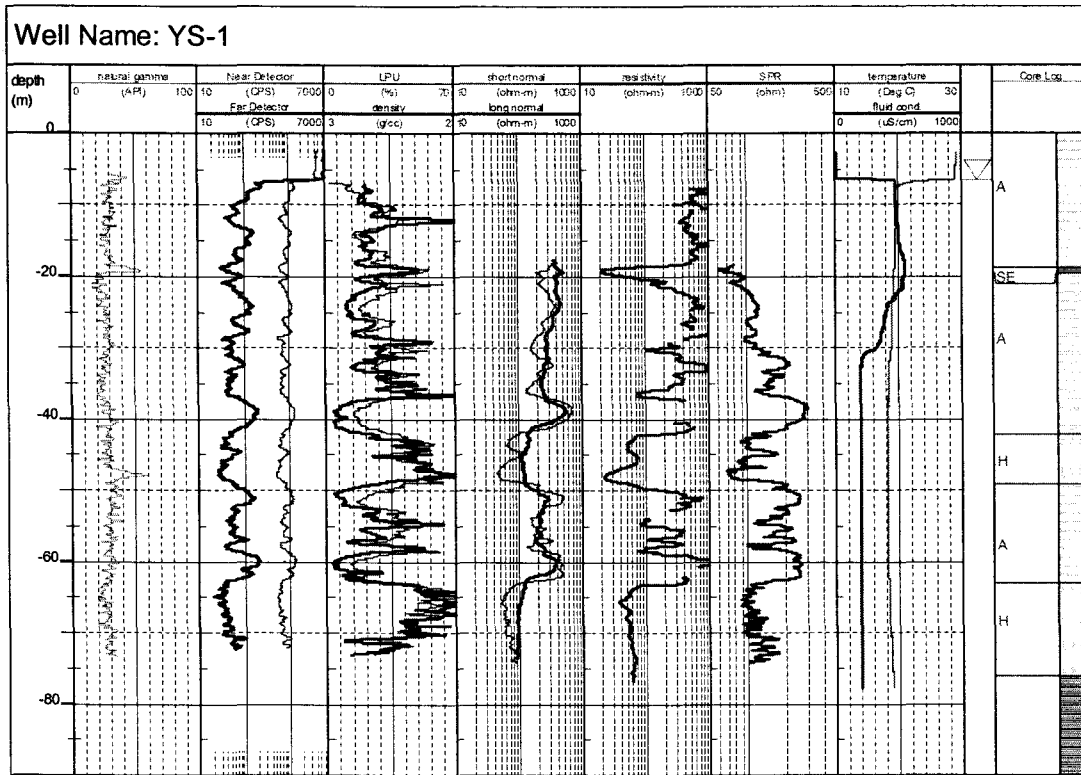


Fig. 3. Geophysical well logs in borehole YS-1. Symbol A, SE, and H is trachy basalt, sedimentary, and hyaloclastite, respectively. Sedimentary and Hyaloclastite show that the resistivity and density are low, and the porosity is high. The intensity of natural gamma is high in the sedimentary interval at about 19 m.

전기비저항은 시추공의 영향을 작게 받는 장노말(Fig. 3에서 long normal로 표기)을 기준으로 약 2,000 ohm-m 이상의 전기비저항을 보이며 수중화산쇄설성퇴적층보다 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 전자유도검층으로 측정된 전기비저항(Fig. 3에서 resistivity로 표기)은 동일한 침상 현무암인 경우, 포화도가 불포화대보다 낮은 전기비저항을 나타내며 매우 특징적인 것은 용암의 분출과 관련된 전기비저항의 변화를 보인다는 점이다. 즉, 동일한 침상현무암 내에서 공극률이 높은 구간에서 전기비저항이 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 심도 약 20 m 하부에 위치하는 2개의 침상현무암은 중성자검층과 전자유도검층 자료를 기준으로 각각 3회의 용암 분출(또는 유동)이 있는 것으로 해석된다. 높은 공극률을 보이는 수중화산쇄설성퇴적층은 용암이 물(바닷물)과 만나 급격히 냉각하면서 생성되기 때문에 높은 공극률을 보이며 지하수 유동(해수침투 포함)의 주요 통로로 해석된다. 퇴적층은 퇴적환경에 따라서 차이가 있지만 주로 점토성분의 영향으로 높은 자연감마선과 높은 공극률(실제 공극률이 높은 것이 아니라 점토성분에 의해 높게 측정됨), 낮은 전기비저항 특성을 갖는다. 시추공 하부에서 발견되는 U층의 경우도 퇴적층과 유사하게 높은 자연감마선과 공극률, 낮은 전기비저항의 특징을 보인다. TF로 표기되는 응회암은 전반적으로 높은 공극률을 보이나 자연감마선은 폭 넓은 변화 보인다. Fig. 3과 같이 동일한 지층에서도 물성변화가 크기 때문에 다양한 물성의 측정은 물론 현무암에 대한 지질학적인 특성을 이해해야 각 지층에 대한 물리적 특성을 보다 명확하게 이해할 것으로 판

단된다. 용수 1호공에서의 온도검층 자료는 지하수위에서 수중화산쇄설성퇴적층까지는 감소하다가 침상현무암층 구간은 온도변화가 없고 수중화산쇄설성퇴적층 구간을 통과하면서 증가하는 변화를 보인다. 시추공 내에서 온도의 변화가 작거나 없다는 것은 수직의 공내수 흐름으로 온도 변화율이 작음을 의미한다. 따라서 두개의 수중화산쇄설성퇴적층이 주요 대수층의 역할을 하고 두 지층 사이에 지하수의 유동이 있음을 추정할 수 있다.

용암의 분출단위와 관련된 것은 수산-2호공에 대한 물리검층 자료에서도 잘 나타나고 있다. Fig. 4는 수산-2호공에 대한 물리검층 자료 중의 일부로 자연감마선검층 자료에서는 구분 어렵지만 중성자검층의 원시자료(Fig. 4에서 Near Detector 및 Far Detector로 표기), 중성자검층으로 추정된 공극률 변화, 전자유도검층으로 측정된 지층의 전기전도도(induction cond.로 표기)는 하나의 지층 내에서 용암의 분출양상을 잘 구분하고 있는 것을 알 수 있다. 그림에서 실선은 코아로깅에 의한 지층의 구분이고 점선은 각 지층 내에서의 용암 분출 단위(횃수)를 의미한다.

Fig. 5는 삼양 1호공(SY-1)에 대한 물리검층 결과로, 앞에서 기술한 바와 같이 자연감마선검층, 중성자검층, 감마-감마(밀도)검층, 전기비저항 등의 물리검층 반응과 코아로깅이 잘 일치하고 있다. Fig. 6은 SY-1호공의 시추코아에 대한 것으로 물리검층 반응 중에서 공극률이 높고 전기비저항이 작은 구간을 중심으로 정리한 것이다. 동일한 지층이라도 균열(또는 공극률)의 정도에 따라서 물성이 변하며 특히, 공극률의 높은 구간에서는 코아의 회수율이 낮은 것을 알 수 있다. 코아에 기재된 심도를 중심으로 물리검층 자료를 비교-검토하는 과정에서 심도차이는 코아 회수율에 따른 오차이며 코아로깅 자료, 물리검층 자료와 함께 시추코아에 대한 확인은 필요하다.

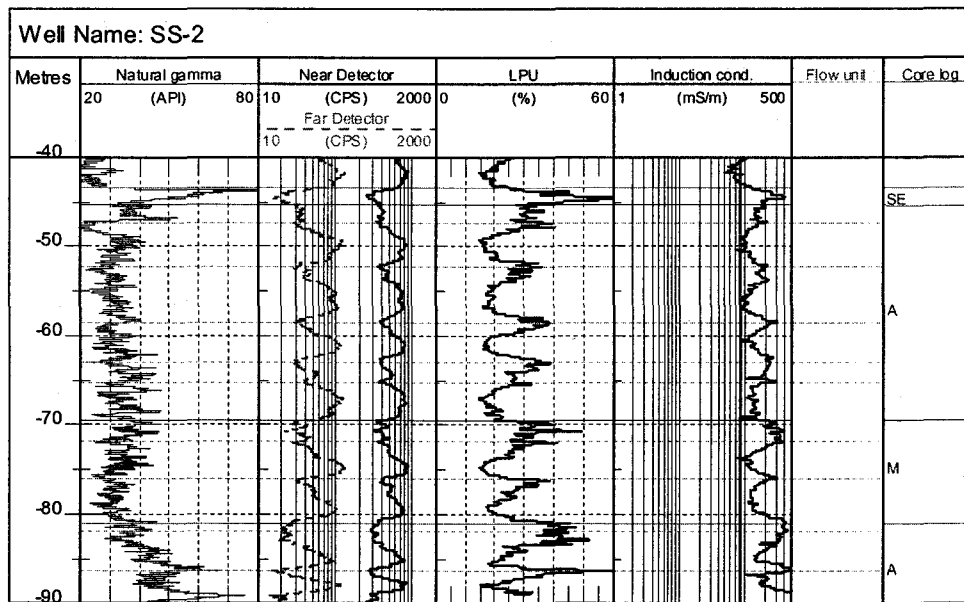


Fig. 4. Geophysical well logs in borehole SS-2. The response of neutron logs (CPS of Near & Far detector and LPU) and the induction conductivity show the characteristics of basalt flow. Solid line is the lithology boundary and dotted line is the flow unit. Symbol A and M are Trachybasalt and Mujangol basalt, respectively.

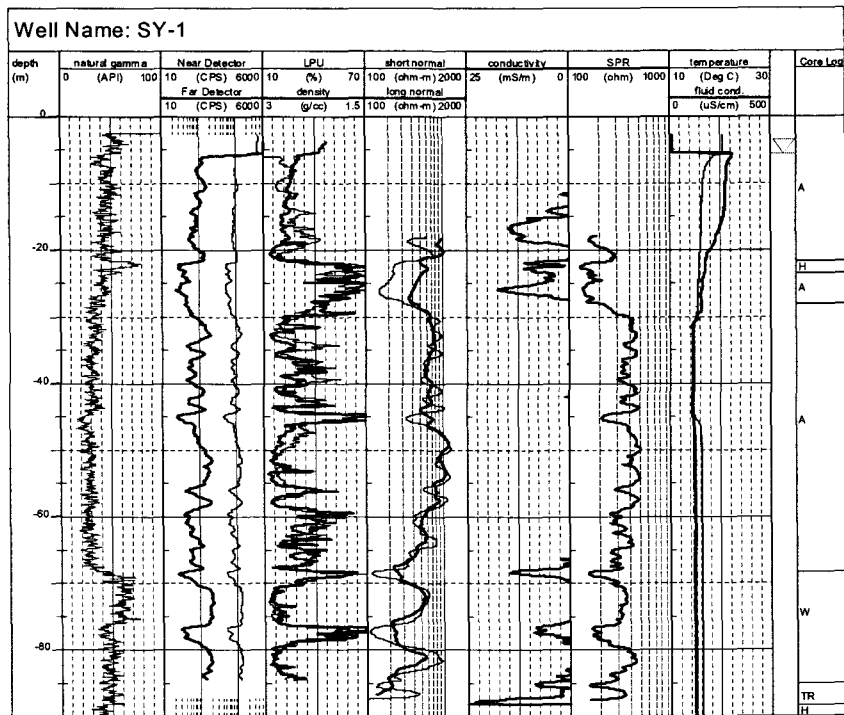


Fig. 5. Geophysical well logs in borehole SY-1. Symbol W and TR are acicular basalt, and trachy rock, respectively.

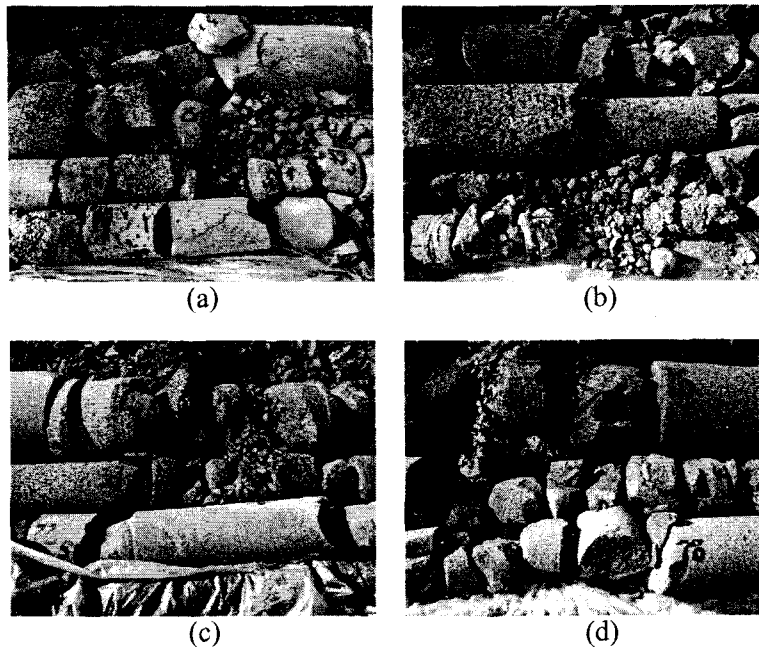


Fig. 6. Photographs of drill cores in borehole SY-1. (a) Hyaloclastite (a depth of 22~24 m) shows the low resistivity & density, and high porosity but almost drill cores are lost, (b) Trachybasalt (a depth of about 31 m) shows the low porosity, (c) Trachybasalt (a depth of 37~39 m) shows the signatures of basalt flow grading from a more porous to massive flow, and (d) the fractured trachybasalt (a depth of 40.5~44.5 m) also shows the low porosity.

(2) 수산지역 시추공에 대한 물리검층 결과

제주도 동부에 위치하는 수산지역에는 4개의 해수침투 관측망이 위치하며 해안에서 약 8 km 까지 수직으로 위치한다. 이들 4개 시추공(SS-1, SS-2, SS-3 및 SS-4)에 대하여 물리검층을 수행하였고 자료처리 결과는 Fig. 7 ~ Fig. 10과 같다. 각 관측정의 지하수위는 해수면과 거의 동일하여 불포화대가 깊은 심도까지 분포하며 제주도 동부 지역의 시추공에서 동일한 특징을 보이고 있다. 4개의 시추공에 대한 물리검층 자료 중에서 전자유도검층으로 측정된 전기전도도는 서로 상이한 환경에서 측정된 자료이다. 즉, 시추공 SS-1은 PVC 케이싱이 삽입된 상태에서 2004년도에 측정된 자료이고 시추공 SS-2 ~ SS-4는 2002년도 시추공 굴착이 완료 또는 진행되는 중간에 측정된 자료이다. 물리검층 자료 중에서 포화대와 불포화대의 특징이 잘 나타나는 것은 중성자검층과 전자유도검층으로 공내수의 유무와 공내수의 전기전도도의 특성에 따라서 반응 값이 변하는 것을 알 수 있다. 중성자검층 자료 중에서 포화대 구간 자료는 앞에서 언급한 것처럼 용암의 분출 양상을 잘 표현하고 있지만 불포화대 구간에 대한 중성자검층 자료는 지층의 변화나 용암의 유동에 대한 변화의 폭이 작음을 알 수 있다. 퇴적층의 경우, 상대적으로 낮은 중성자 반응값(Far와 Near에서의 CPS)과 전자유도검층의 높은 전기전도도에서 구분이 가능하며 자연감마선검층 자료를 동시에 해석하는 경우, 암상 변화에 대한 해석은 가능한 것으로 판단된다. 제주도 동부지역은 해수침투가 광범위하게 발생하는데 수산지역의 4개 시추공에 대한 전기전도도검층 자료를 보면 시추공 SS-3과 SS-4호공 사이에 염/담수의 전이대가 존재함을 알 수 있다. 이들 해수침투대가 존재하는 시추공 SS-1, SS-2 및 SS-3에 대한 온도 및 전기전도도 자료, 온도 및 전기전도도의 변화율검층 자료(그림에서 ΔT 및 ΔEC 로 표기했으며 온도와 전기전도도는 각각 심도 100 m 및 1 m 변화에 대한 변화율임)를 보면 심도에 따른 온도변화가 작고 이와 같은 온도변화 특성은 시추공 내에 수직의 지하수 흐름의 존재를 의미하며 공내수 전기전도도검층 자료를 함께 해석 할 때, 다수의 대수층의 존재하는 것으로 해석된다.

(3) 동부지역 시추공의 온도검층 자료해석

제주도 동부지역은 전술한 바와 같이 해수침투대가 내륙으로 약 8 km 정도까지 발생하고 있으며 현재 해수침투 현상 발생원인과 염/담수 지하수의 공간적인 분포에 대한 연구가 수행 중에 있다(박기화 등, 2004).

Fig. 11(a)는 온도검층 자료를 이용한 지하수 유동 해석의 기본 개념을 나타낸 것으로 온도의 수직적 변화가 작은 구간은 지하수 수직유동이 있는 구간이며 온도검층 자료에서 시추공 하부에 점진적으로 증가하는 구간은 지열구배의 영향을 반영한 것이다. 수산1호공인 SS-1의 경우, 심도 약 20~30 m 구간은 온도변화가 매우 작으며 유향·유속검층에서 상·하의 지하수 흐름이 확인되었으며 온도가 점진적으로 증가하는 30~40 m 구간은 혼합수가 존재하는 구간으로 지하수의 흐름이 없는 구간이다. 심도 약 110 m 구간은 전기전도도의 연중 변화가 큰 구간이며 유향·유속검층에서 유속이 미약하게 측정되었고 다수의 대수층이 존재할 것으로 예상되는 구간이다. HDD-1은 함덕 1호공으로 담수지하수 시추공으로 SS-1호공과 동일한 개념으로 해석할 수 있으며 수리지질학적인 단위로 구분할 때, 폭이 약 70 m 정도인 대수층이 존재하는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 11(b)~(d)는 동부지역 해수침투관측망에 대한 온도검층 자료로 SS는 수산, HC는 하천, JD는 종달, HD는 한동, HDD는 함덕을 의미하며 시추공의 위치는 Fig. 2에 있다. Fig. 11(b)는

해안에서 가장 가까이에 위치하는 관측공으로 심도 20~30 m 부근에 가장 낮은 온도의 지하수가 분포하며 이들 지하수는 전기전도도가 낮은 담수 또는 혼합수의 지하수이다. 그리고 이들 지하수 하부에 염수 지하수가 분포한다. 낮은 온도 특성을 보이는 담수 또는 혼합수의 지하수 분포는 내륙으로 갈수록 폭이 증가하며 온도검층 자료에서도 폭이 증가하는 것을 알 수 있다. (d)에서 중달지역은 다른 지역보다 좀더 내륙까지 염수 지하수가 존재하는데 담수지하수의 폭(그림에서 freshwater 표기)이 다른 지역보다 작은 것을 알 수 있다.

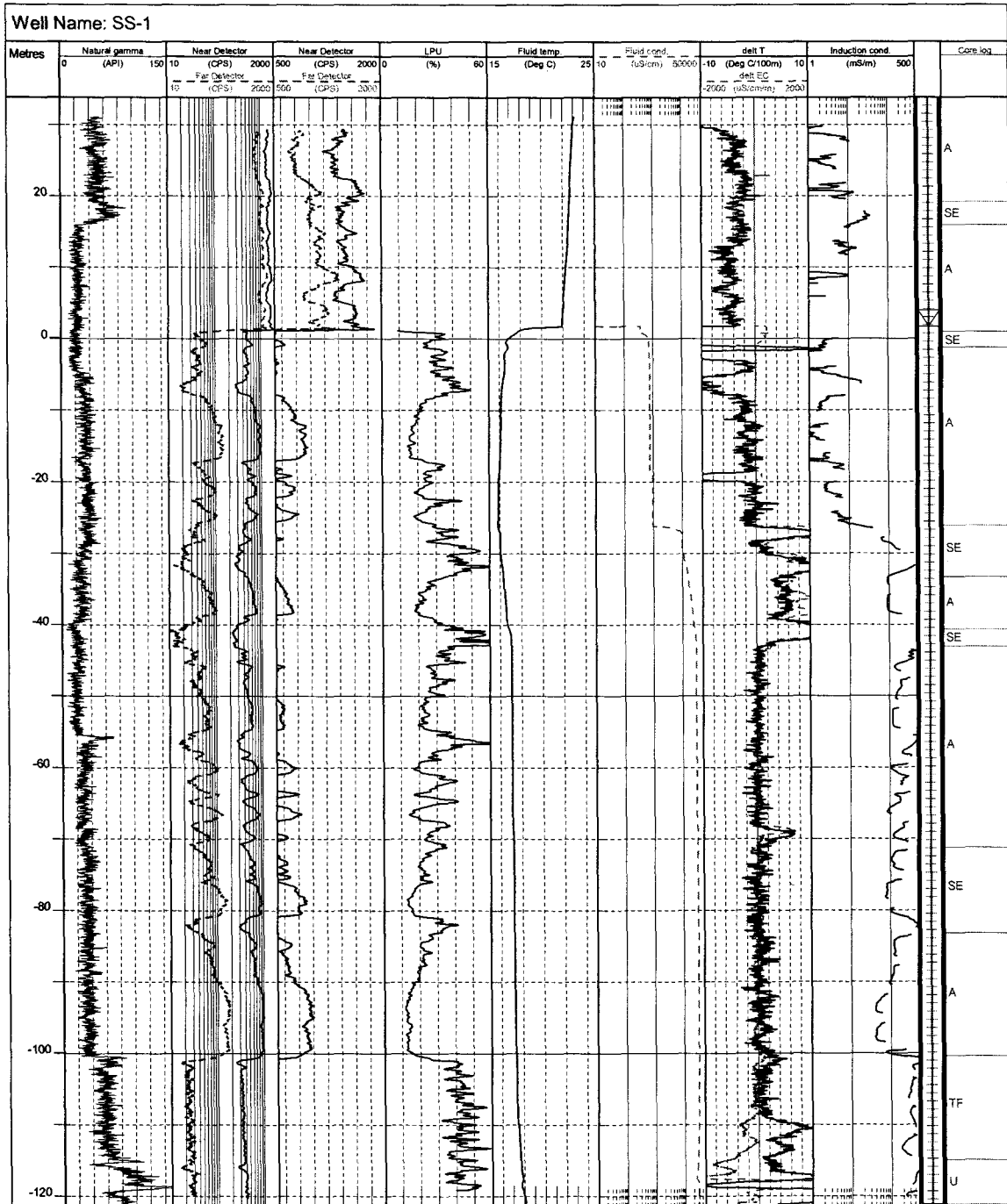


Fig. 7. Geophysical well logs in borehole SS-1.

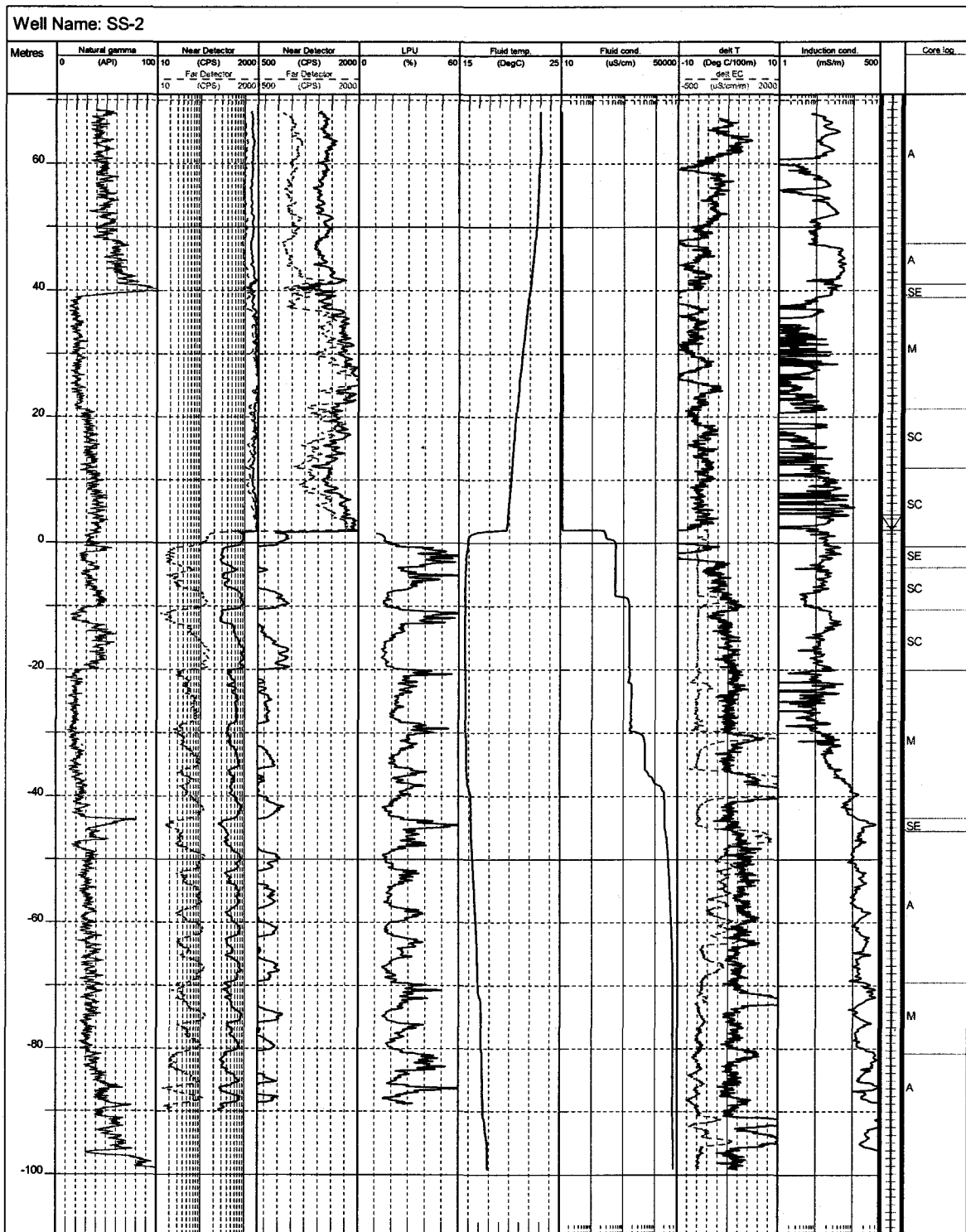


Fig. 8. Geophysical well logs in borehole SS-2.



Fig. 9. Geophysical well logs in borehole SS-3.

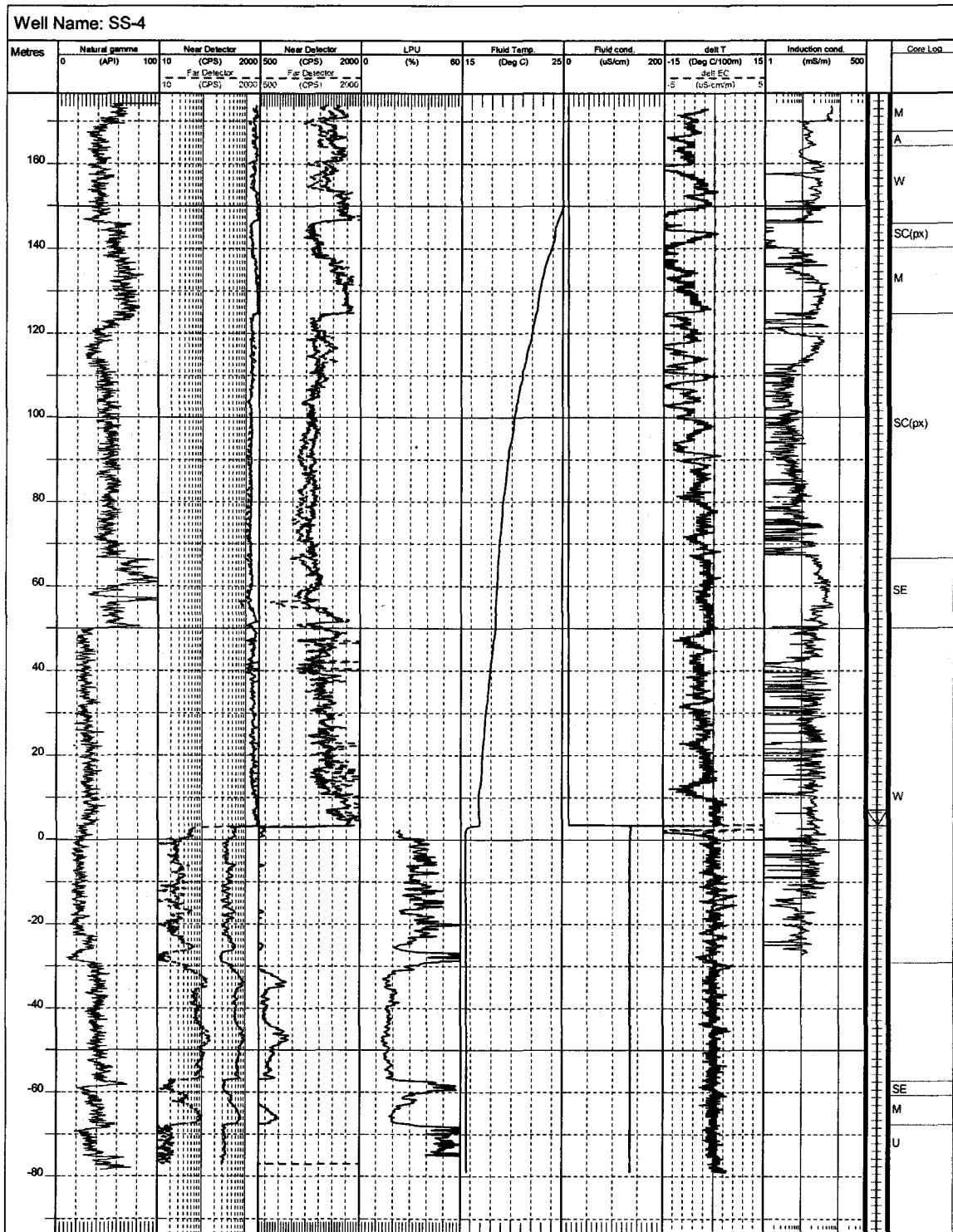


Fig. 10. Geophysical well logs in borehole SS-4.

Fig. 12는 수산지역에 대한 온도검층 자료만을 나타낸 것으로 ‘→’ 표기된 구간은 내륙에서 해안가로 갈수록 온도가 증가하는 구간(시추공 SS-1, SS-2, SS-3)을 나타낸다. ‘↘’은 전기전도도검층에서 염수지하수체가 시작되는 심도를 보여주며 온도 및 전기전도도의 변화 특성이 잘 일치하고 있음을 나타낸 것으로 온도검층 자료가 지하수의 유동해석에 효과적임을 보여준다. 원으로 표기된 구간은 온도의 변화가 비교적 일정한 구간으로 지층이 유사한 구간으로 구성되어 있다.

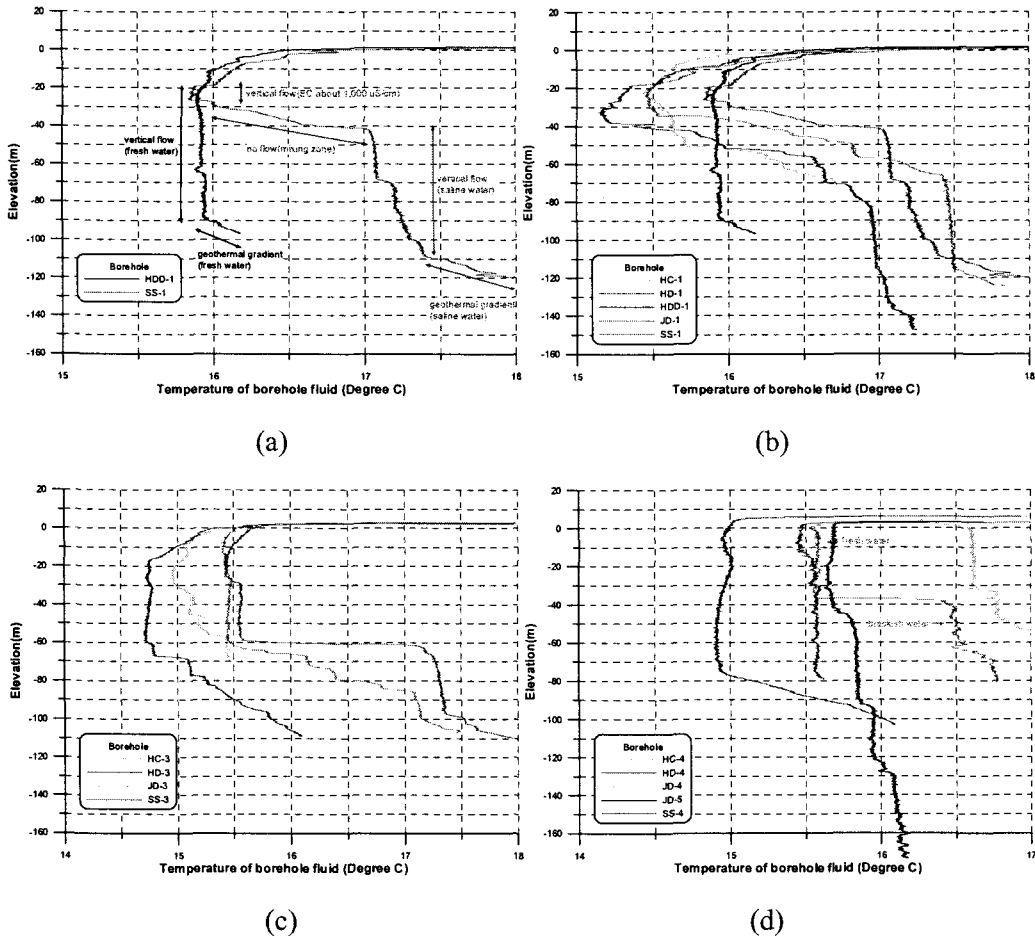


Fig. 11. Temperature logs at the boreholes of eastern area, Jeju Island. (a) the typical interpretation of the temperature logs at boreholes SS-1 & HDD-1. (b), (c) & (d) are the temperature profiles of boreholes.

황세호, 신재현, 박인화, 최선영, 박기화, 고기원

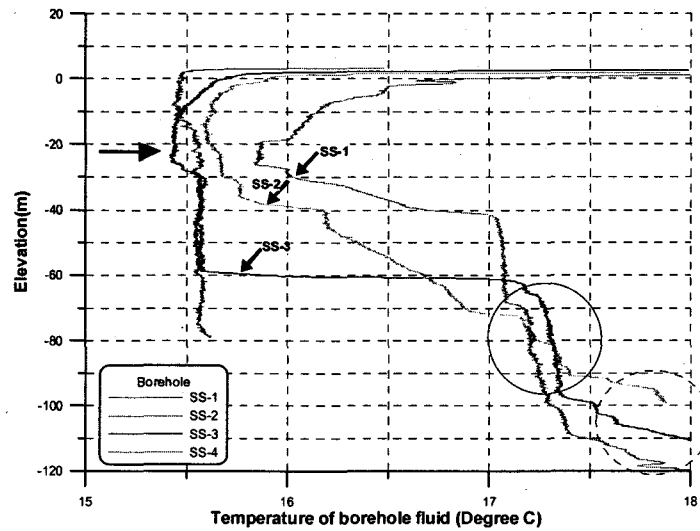


Fig. 12. Results of temperature logs in Susan area. The oblique arrows indicate the top of the saline water in fluid conductivity logs. The horizontal arrow indicates the increasing zone of the temperature logs for borehole SS-1, SS-2, and SS-3, and also the aquifer of the fresh water or brackish water. The saline water intrusion in this area has been effected by the several aquifer from the viewpoint of the characteristics of temperature changes.

5. 결론

현무암으로 구성된 제주 지역에서 용암분출과 관련된 물리검층의 반응해석과 동부지역에서 광범위하게 발생하고 있는 해수침투대 특성을 해석하고자 다양한 물리검층 자료를 취득·해석하였다. 포화대 구간에서의 물리검층 반응은 용암의 분출과 흐름과 관련된 반응이 뚜렷이 확인되었으며 특히, 중성자검층과 전기비저항검층은 용암유동의 특성을 잘 반영하였는데 분출된 용암이 흐르면서 외부와 노출된 부분은 급격하게 굳으면서 많은 기공이나 균열이 발생하여 높은 공극률과 낮은 전기비저항을 나타내며 서서히 굳는 안쪽은 구성이 치밀하여 높은 전기비저항과 낮은 공극률을 나타냈다. 용암이 분출하면서 바닷물과 만나서 형성되는 수중화산쇄설성퇴적층은 높은 공극률과 낮은 전기비저항을 나타내며 코아의 유실이 많은 구간이기도 하다. 용암분출 사이에 형성된 퇴적이나 제주도 기저에 분포하는 U층, 서귀포층은 낮은 전기비저항, 높은 공극률의 특성을 나타냈다. 치밀한 구조를 갖는 침상현무암의 경우, 높은 전기비저항과 폭 넓은 공극률의 범위를 보인다.

동부지역에 위치하는 해수침투 관측정에 대한 온도검층 자료의 해석결과는 이 지역의 수리지질학적인 단위구분에 이용될 수 있음을 제시하였다. 온도/전기전도도검층 자료에서 대수층의 폭을 추정할 수 있었으며 해안에서 내륙으로 갈수록 담수지하수/혼합수의 폭이 증가하는 것으로 해석되었다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원에 수행하는 기본사업인 '제주도 지하수 부존특성에 대한 지구과학적 해석'연구의 일부이며 자료취득 과정에 많은 도움을 준 광역수자원본부 박윤석 선생님

과 제주도 농업기반공사의 김창옥 선생님, 물리검층 장비 유지보수에 많은 도움을 한국지질자원연구원 성낙훈 선생님, 그리고 논문자료 정리에 도움을 준 오하연씨에게 감사드립니다.

참고문헌

- 박기화, 고동찬, 김구영, 김상연, 김용제, 김태희, 문상호, 박권규, 박인화, 성기성, 성낙훈, 송경선, 신제현, 심병완, 이봉주, 이종철, 이철우, 지세정, 하규철, 황세호, 김석중, 고기원, 박윤석, 강봉래, 2004, 미래 제주도 청정 지하수 공급 시스템 구축 사업, 한국지질자원연구원 연차보고서, 일반-04(연차)-02, 214 p.
- 송윤호, 정승환, 이상규, 김정호, 황세호, 황학수, 이성곤, 조성준, 이명중, 설순지, 박인화, 2000, 지반 물리탐사 연구, 한국지질자원연구원 연구보고서, 1999-R-TI02-P-01, 111 p.
- Becker, K., Sakai, H., Adamson, A. C., Alexandrovich, J., Alt, J. C., Anderson, R. N., Bodeau, D., Gable, R., Herzig, P. M., Houghton, S., Ishizuka, H., Kawahata, H., Kinoshito, H., Langseth, M. G., Lovell, M. A., Malpas, J., Masuda, H., Merrill, R. B., Morin, R. H., Mottl, M. J., Pariso, J. E., Pezard, P., Phillips, J., Sparks, J., Uhlig, S., 1989, Drilling deep into young oceanic crust, Hole 504B, Costa Rica Rift, *Rev. Geophys.*, **27**, 79-102.
- Brewer, K., Sakai, H., Adamson, A. C., Alexandrovich, J., Alt, J. C., Anderson, R. N., Bideau, D., Gable, R., Herzig, P. M., Houghton, S., Ishizuka, H., Kawahata, H., Langseth, M. G., Lovell, M. A., Malpas, J., Masuda, H., Merrill, R. B., Morin, R. H., Mottl, M. J., Pariso, J. E., Pezard, P., Phillips, J., Sparks, J., Uhlig, S., 1989, Drilling deep into young ocean crust, Hole 504B, Costa Rica Rift, *Rev. Geophys.* **27**, 79- 102.
- Broglia, C., Ellis, D., 1990, Effect of alteration, formation absorption, and standoff on the response of the thermal neutron porosity log in Gabbros and Basalts: examples from Deep Sea Drilling Project-Ocean Drilling Program Sites, *J. Geophys. Res.*, **95**, 9171-9188.
- Buckley, D. K., Oliver, D., 1990, Geophysical logging of water exploration boreholes in the Deccan Traps, Central India, in Hurst, A., Lovell, M. A., Morton, A. C. (Eds.), *Geological Applications of Wireline Logs*, Geol. Soc. London Spec. Publ., **48**, 153- 161.
- Crosby, J. W., Anderson, J. V., 1971, Some applications of geophysical well logging to basalt hydrology, *GroundWater*, **9**, 12- 20.
- Goldberg, D., 1977, The role of downhole measurements in marine geophysics, *Rev. Geophysics*, **35**, 315-342.
- Helm-Clark, C. M., Rodgers, D. W., and Smith, R. P., 2004, Borehole geophysical techniques to define stratigraphy, alteration and aquifers in basalt, *J. of Applied Geophysics*, **55**, 3-38.
- Knutson, C. F., Sullivan, W. H., Dooley, K. J., 1994, Geotechnical logging evaluation of the Eastern Snake River Plain Basalts, *Soc. of Prof. Well Log Analysts 34th Annual Logging Symposium*, 1-17.
- Versey, H. R., Singh, B. K., 1982, Groundwater in the Deccan basalts of the Betwa basin, India, *J. Hydrol.*, **58**, 276- 306.