

## 제주 현무암 지역에서 물리검층 자료 해석

황세호<sup>1\*</sup> · 신제현<sup>1</sup> · 박기화<sup>2</sup> · 박인화<sup>2</sup> · 고기원<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부

<sup>3</sup>제주특별자치도 수자원본부 수자원연구실

### Geophysical Well Logs in Basaltic Volcanic Area, Jeju Island

Seho Hwang<sup>1\*</sup>, Jehyun Shin<sup>1</sup>, Ki Hwa Park<sup>2</sup>, Inhwa Park<sup>2</sup> and Gi-Won Koh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Geological & Environmental Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>3</sup>Water resources management office of Jeju Government

**요약:** 화산섬 제주도에서 용암분출에 따른 물리검층 반응특성을 고찰하기 위하여 다양한 물리검층을 수행하였다. 지질조사 목적으로 다양한 물리검층을 수행한 사례가 없어 제주도 지질의 특이성에 대한 이해의 폭이 물리검층 자료의 해석에 매우 중요한 역할을 한다. 제주도의 지하수자원의 체계적인 개발과 보전 목적으로 해안을 중심으로 해수침투관측망을 구축하고 있다. 이들 해수침투관측망 중에서 나공 시추공에 대한 물리검층 결과, 지하수위 하부인 포화대 구간에서의 물리검층 반응은 용암의 누층과 관련된 반응이 뚜렷이 확인되었으며 특히, 중성자검층, 감마-감마(밀도)검층 및 전기비저항 검층은 용암유동의 특성을 잘 반영하였다. 수증화산쇄설성퇴적층은 높은 공극률, 낮은 전기비저항과 밀도를 나타냈다. 제주도 지역에서 수행한 물리검층 자료는 지질학적인 특성을 잘 반영하고 있어 물리검층의 적용성이 높은 것으로 판단된다.

**주요어:** 물리검층, 현무암, 원위치 물성

**Abstract:** A variety of geophysical well loggings have been conducted to investigate the geological characteristics for basaltic volcanic area in Jeju Island. Specially, there is no precedent case study using geophysical well loggings in Jeju Island. And so, the proper understandings for geological features of Jeju Island are the key to interpret geophysical well logs. Presently, seawater intrusion monitoring systems have been constructed for systematic development and conservation of groundwater resources. As the results of geophysical well loggings in this seawater intrusion monitoring boreholes, the responses of well logs for saturated zone have distinctly identified basalt sequences. In particular, neutron logging, gamma-gamma (density) logging, and resistivity logging have well exhibited the characteristics of lava flows and lithologic boundaries. In hyalocastite, porosity is high, and resistivity is low. Eventually, geophysical well logs are useful for securing sustainable development of groundwater in Jeju Island in that it has identified the characteristics of geological responses.

**Keywords:** geophysical well logs, basalt, in situ physical properties

## 서 론

화산섬 제주도에서 용암분출에 따른 물리검층 반응특성을 고찰하기 위하여 다양한 물리검층을 수행하였다. 국내에서 수행하고 있는 물리검층은 주로 지반조사나 자원평가 및 환경오염조사 등에 관련된 것으로 화산암과 화산쇄설암으로 구성된 제주도에서 지질조사 목적으로 이상규 등(1996)이 다양한 물

리검층을 최초로 수행한 바 있다. 이상규 등(1996)은 3 개의 시추공에 대하여 다양한 물리검층 자료를 취득하여 해석을 수행하였으나 시추공어 및 시추공 환경에 대한 정보 부족으로 정량적인 해석에 어려움이 많았으며 화산섬 제주도에서 물리검층법을 이용하여 지질학적 해석의 처음으로 시도한 점에서 의미가 있다 할 수 있다. 현무암 지역에 대한 물리검층 국외 사례는 Crosby and Anderson (1971), Goldberg (1997), Becker *et al.* (1989), Buckley and Oliver (1990), Versey and Singh (1982), Brewer *et al.* (1998) 등이 있으며 주로 일반적인 물리검층의 적용성 검토, 포화대/불포화대에서 물리검층 적용의 한계 등에 대한 것으로 전반적으로 규모가 큰 지역인 인도의 Deccan Trap, 보츠와나의 Karoo 현무암, 하와이 등에서 물리검층 사례가 있다. 이들 연구 내용 중의 특이 사항은

2006년 8월 9일 접수; 2006년 8월 26일 채택  
한국물리탐사학회 제7회 특별 심포지엄 시추공 물리탐사에서(일부)발표  
\*Corresponding author

E-mail: hwangse@kigam.re.kr

Address: Geological and Environmental Hazards Division,  
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,  
30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

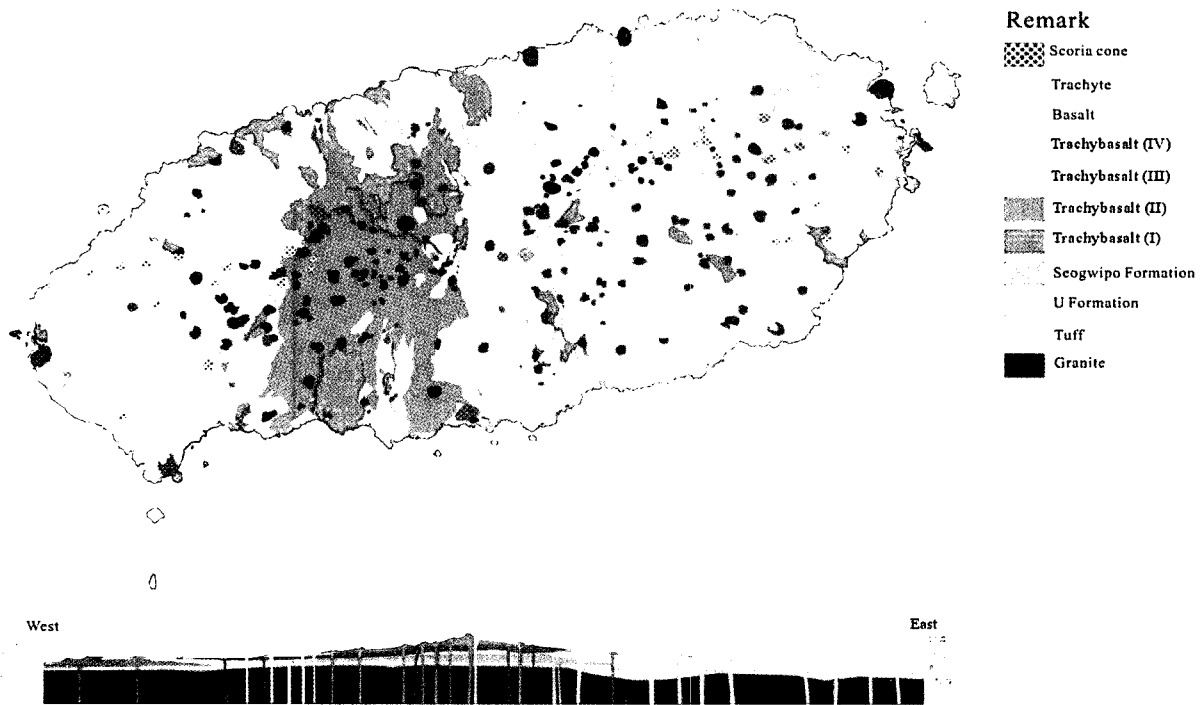


Fig. 1. Geological map of Jeju Island.

용암분출의 규모가 크기 때문에 각 시추공에서의 물리검층 반응을 이용한 수평적인 연결성 파악에 많은 관심을 가졌다는 점이다. Helm-Clark *et al.* (2004)은 최근까지 현무암 지역에서 수행된 물리검층 결과를 수집·분석하여 주로 퇴적층 환경에서 개발된 물리검층법의 적용성과 한계를 정리하였다. 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.

제주특별자치도에서는 제주도의 수자원으로 중요한 지하수 자원의 체계적인 개발과 보전 목적으로 제주 해안을 중심으로 해수침투관측망을 구축하고 있다. 지금까지의 연구결과 제주도의 지하수는 지질학적인 특성에 규제를 받고 있는 것으로 해석되고 있다(제주도, 2001, 2002; 박기화 등, 2004). 따라서 제주도 광역수자원관리본부에서 연차적으로 설치하고 있는 해수침투 관측망은 제주도 지질 및 연안지하수의 유동특성을 이해하는데 매우 중요한 역할을 하고 있다. 이들 관측망에 대해서 2004년부터 다양한 물리검층 자료를 체계적으로 취득하기 시작했으며 이들 물리검층 자료는 제주도 지질을 이해하는데 많은 역할을 할 것으로 기대하고 있다. 물리검층 결과 중에서 공극률은 제주도 지하수자원의 부존량 평가에 이용될 예정이며 물리검층 자료는 지하수 유동과 지질학적 특성과의 관계, 동부지역의 해수침투 현상에 대한 연구 등에 이용될 예정이다. 본 논문에서는 물리검층 자료 해석과 관련한 제주도 지질 개요, 현무암 지역에서 물리검층 자료해석의 고려사항, 물리검층 자료취득 현황, 제주 동부, 북부 및 서부에 위치하는 3개 나

공(openhole)의 지하수위 하부인 포화대 구간에 대한 물리검층 자료 해석에 대한 결과를 기술한다.

## 지질 개요

제주도의 화산활동은 약 160만 년 전부터 5000 년 정도까지 계속되었다. 제주도가 형성되는 기간에 빙하기와 관련하여 해수면의 변화가 있었으며 용암이 해수로 유입되는 현상이 시추공의 코어에서 종종 관찰된다. 제주도는 하부에 중생대 화강암이나 용결응회암으로 구성되어 있으며 해수면 하부 -60 ~ 150 m 부근에서 미고결 상태인 빨과 모래로 구성된 U층이 존재하며 이들 U층은 시추코어에서 확인된다. U층은 제주도가 육지와 연결되었을 때 해안가에 분포했던 퇴적층으로 황하강 또는 양자강에 이어진 삼각주 형태로 분포했던 지층으로 추정된다. 빙하기에서 해빙기로 이어지면서 해수면은 상승하였고 해수면이 높아진 시기에 용암이 분출하여 수중화산쇄설성퇴적층(Hyaloclastite)을 형성하기도 하였다. 수중화산쇄설성퇴적층이 형성되는 수위는 그 당시의 해수면의 높이를 지시하는데 현재의 해수면 보다 5 m 높은 위치에서도 수중화산쇄설성퇴적층이 산출되기도 한다. 수중화산쇄설성퇴적층은 왕모래 크기 또는 잔자갈 크기로 구성되어 있고 분포 면적이 넓기 때문에 지하수의 함유 역할이 클 것으로 해석된다. U층 상부에는 시기를 달리하는 응회암과 퇴적층이 존재하며 동부지역은 약 -110 ~ -150 m 정도, 서부는 약 -40 ~ -70 m 범위에 존재한다.

제주도 지질은 용암의 점성에 따라 크게 좌우되는데 제주도

에서 ‘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 41 회의 용암 분출에 의해 형성되었으며 분출지는 시기마다 다르고 분출지에는 대부분이 분석구가 위치하고 있다. 지표에 분포한 분석구(Scoria cone)는 대략 350 개 정도인데 이들 분석구는 대부분이 aa성 용암이 분출할 때 만들어진 것이며 분포 암석은 구성 광물의 함량과 종류에 따라서 크게 6 종류로 구분된다. 점성이 높은 aa성 용암이 천천히 흐르면서 상부와 하부는 굳게 되고 내부는 계속 유동을 하면서 상부에 굳은 표면이 쉽게 깨져서 용암과 함께 운반되는데 이와 같이 용암의 상부에 굳어 있는 암석이 깨진 것을 클링커(Clinker)라고 하며 투수성이 좋은 것으로 알려져 있다. 퇴적층은 적화색 혹은 회색의 이암, 사암, 역암으로 구성되며 용암류 사이에 나타난다. 퇴적층은 고지형의 저지대와 하천 혹은 바닷가에서 형성된 것으로 수평 연장은 대체로 짧다(박기화 등, 2003; 박기화 등, 2004). Fig. 1은 제주도의 지질도이며 하부에 중생대 화강암과 용결응회암이 분포하며 시추 조사에 의하면 이들 상부에 U층, U층 상부에는 시기를 달리하는 응회암과 퇴적층(서귀포층 포함)이 존재하며 이들 상부에는 용암분출에 의한 화산암과 화산폭발로 형성된 화산쇄설암이 분포한다.

### 제주도 현무암 지역에서 취득한 물리검층 자료 해석상의 고려사항

화산섬 제주도에서 수행한 물리검층 자료의 해석은 물리검층의 개발환경이 주로 퇴적층이기 때문에 해석과정에서 유의해야 할 사항을 다음과 같이 정리하였다.

#### 자연감마선검층

현무암 지역에서 측정되는 자연감마선은 5~50 API 정도로 매우 작으며 하나의 지질학적 단위 내에서 측정되는 자연감마선은 용암을 구성하는 성분이 동일하기 때문에 변화의 폭이 매우 작은 특징을 보인다. 단위 지층 사이에서 측정되는 높은 자연감마선은 주로 퇴적층과 관련된 것이 많으며 이들 퇴적층은 시추 시 코어 회수율이 낮기 때문에 물리검층 자료에서만 확인되기도 한다. 제주도의 경우 퇴적층이나 U층 구간이 현무암에 비하여 상대적으로 높은 자연감마선을 보인다.

#### 감마-감마(밀도)검층

감마-감마(밀도)검층에서 측정하는 원위치 밀도는 지하수위 하부(또는 포화대)와 지하수위 상부(또는 불포화대)의 특성을 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. 제주도에서 원위치 밀도측정에 이용한 감마-감마(밀도)손데는 담수포화대 환경에서 개발된 장비이기 때문에 담수 지하수 구간에 대한 밀도값의 신뢰도가 가장 높다. 지하수위 상부의 경우, 밀도가 포화대 구간에 비하여 상대적으로 작은 값을 보이며 고염분 지하수로 포화된 구간은 염분농도의 영향을 고려해야 하나 감마-감마(밀도)검층으로 측정하는 체적밀도에 대한 영향은 매우 작을 것으로 판단된다. 용암의 분출에 따른 굳기의 정도에 따라서 밀도의 차이가 발생하기 때문에 용암의 누층 단위를 구별하는 데 이용되기도 한다.

#### 중성자검층

현무암 지역에서 중성자검층을 이용하여 측정하는 공극률은 총 공극률이며 대부분의 장비제조사에서 제공하는 교정곡선(calibration curve)의 작성 과정에서 석회암이나 사암과 같은 퇴적암을 이용하기 때문에 공극률 추정은 가장 어려운 문제이다. Broglia and Ellis (1990)는 DSDP (Deep Sea Drilling Project), Knutson *et al.* (1994)는 ODP (Ocean Drilling Project)에서 현무암 암괴를 이용하여 공극률을 정확하게 측정하고자 하였으며 중성자검층으로 측정한 총 공극률과 유효공극률과의 관련성은 열에 의한 변질이나 점토 등의 영향으로 직접적으로 관련시킬 수는 없었다고 보고하였다. 또한 Helm-Clark *et al.* (2004)은 포화대 구간에서 중성자검층으로 측정하는 공극률은 열변성이나 점토 등의 영향으로 실제보다 과대평가 되는 경향을 지적하였다. 중성자검층은 용암의 분출에 따른 굳기의 정도에 따라서 공극률의 차이가 발생하기 때문에 용암의 누층 단위를 구별하는데 이용되기도 한다. 중성자검층 자료에서 공극률 추정이 가능한 구간은 포화대인 지하수위 하부 구간이며 고염분 지하수 구간에서 열중성자(thermal neutron)를 이용하는 경우 CI에 의한 중성자의 흡수로 실제보다 공극률이 높게 평가되기 때문에 천열중성자(epithermal neutron)를 이용해야 정확한 공극률의 추정이 가능하다(Hearst *et al.*, 2000). 중성자검층에서 측정하는 공극률은 석회암 공극률에 대한 상대 공극률로 LPU (Limestone Porosity Unit)로 표기하며 공극률은 가용 가능한 지하수자원의 평가에 이용된다.

#### 전기검층

전기비저항검층은 나공 상태에서 자료취득이 가능하기 때문에 전기검층을 수행한 시추공은 일부이며 용암의 분출에 따른 굳기의 정도에 따라서 전기비저항이 변하기 때문에 용암의 누층 해석에 이용되며 퇴적층, U층 또는 수중화산쇄설성퇴적층 등에서 낮은 전기비저항 값을 보인다.

#### 전자유도검층

해수침투의 영향을 받고 있는 제주 동부지역의 경우, 지하수 전기전도도의 영향이 뚜렷하며 지하수위 상부 구간이나 치밀

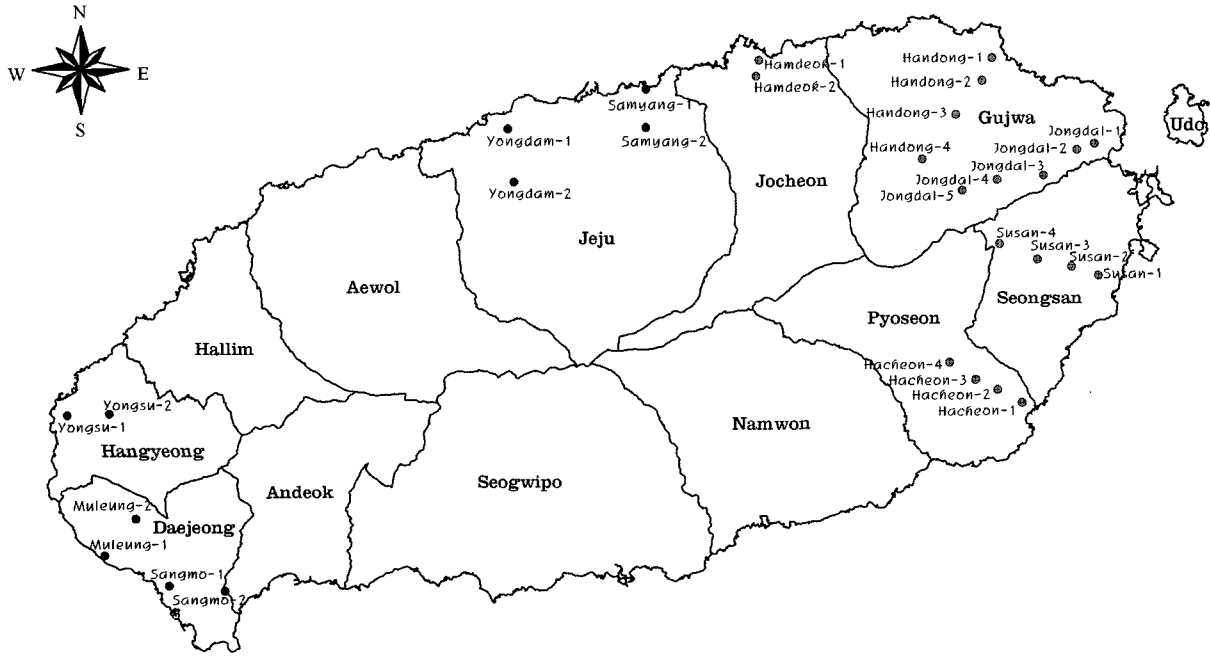


Fig. 2. Location map of boreholes.

한 암석인 구간에서는 높은 전기비저항으로 측정이 어려운 경우가 많다.

### 물리검층 자료취득 및 처리

제주도에서 적용한 물리검층은 방사능검층인 자연감마선검층, 중성자검층, 감마-감마(밀도)검층과 전기검층 및 전자유도검층, 공경검층, 공내수의 온도 및 전기전도도검층 등이다. 물리검층 시스템은 영국 Robertson Geologging사에서 제작한 Micro-logger II system과 다양한 계수형 손테, 그리고 winch 등이다. 측정간격은 기본적으로 1 cm이고 각 검층자료에 적절한 이동평균법을 적용하였으며(송윤호 등(2000)의 제3장 참조) 검층의 속도는 3 m/min이나 시추공의 상태에 따라서 검층 속도를 조절하였다. 물리검층 자료취득 및 처리에 대한 품질관리는 황세호 등(1999a, 1999b, 2000, 2001, 2004)을 참조하였으며 심도는 지표를 기준으로 하였다. 물리검층을 수행한 시추공은 Fig. 2와 같으며 해수침투 관측망 27 개 관정, 인공함양정 2 개 관정으로 본 논문과 관련된 시추공은 제주도 동부, 북부 및 서부에 위치하는 수산 2호공, 용수 1호공, 삼양 1호공이다. 이들 시추공은 Fig. 2에서 각각 Susan-2, Samyang-1, Yongsu-1로 표기하였다. 물리검층 자료는 2004년 6월 말부터 자료취득을 시작했기 때문에 일부 시추공은 나공상태에서 자료취득이 가능하였으나 2003년까지 굴착한 시추공과 2004년도의 일부 시추공은 케이싱이 삽입되어 제한된 조건하에서 물리검층 자료를 취득하였다.

### 물리검층 자료 해석

물리검층 자료의 해석은 모든 시추공에서 코어를 회수하고 코어로깅을 수행했기 때문에 코어검층과 물리검층의 반응 특성을 비교하고 적용성에 대한 분석을 수행하는 것을 주요 목적으로 하였으며 이와 같은 이유는 현무암 지역에서의 물리검층 자료에 대한 해석 사례가 이상규 등(1996)이 유일하고 무엇보다도 현무암 지역에서 물리검층 적용성에 대한 검토가 중요하기 때문이다. 제주도에서 수행한 물리검층 중에서 감마-감마(밀도)검층, 중성자검층 및 전기검층/전자유도검층, 자연감마선검층이 용암분출 특성이나 퇴적층의 지층 대비에 효과적이며 이는 Helm-Clark *et al.* (2004)의 결과와도 잘 일치한다. 대자율검층, 스펙트럴자연감마선검층이 현무암 지역에서 지층 구분에 보다 더 효과적이지만 국내에서 이용 가능한 장비를 적용해도 좋은 결과를 보여주고 있다. 물리검층 및 코어로깅 자료에서 코어 회수율에 따른 심도의 상하 이동, 코어의 회수가 불가능한 구간에 대한 물리검층 반응에서 나타나는 미고결 지층 등이 일부 시추공에서 확인되었으나 물리검층 및 코어로깅 자료는 전반적으로 잘 일치하고 있다.

Fig. 2와 같이 제주도 연안을 따라서 굴착된 해수침투관측망 중, 나공 환경에서 수행한 물리검층은 총 6 개 시추공이며 전 구간에 대한 물리검층이 가능한 시추공은 4 개 시추공이다. 본 논문에서는 자료의 신뢰도가 높은 4 개의 나공 중에서 서부의 동일한 지역에 위치하는 시추공 중에서 1 개(용수 1호공), 북부지역의 삼양 1호공, 그리고 동부지역의 수산 2호공에 대한

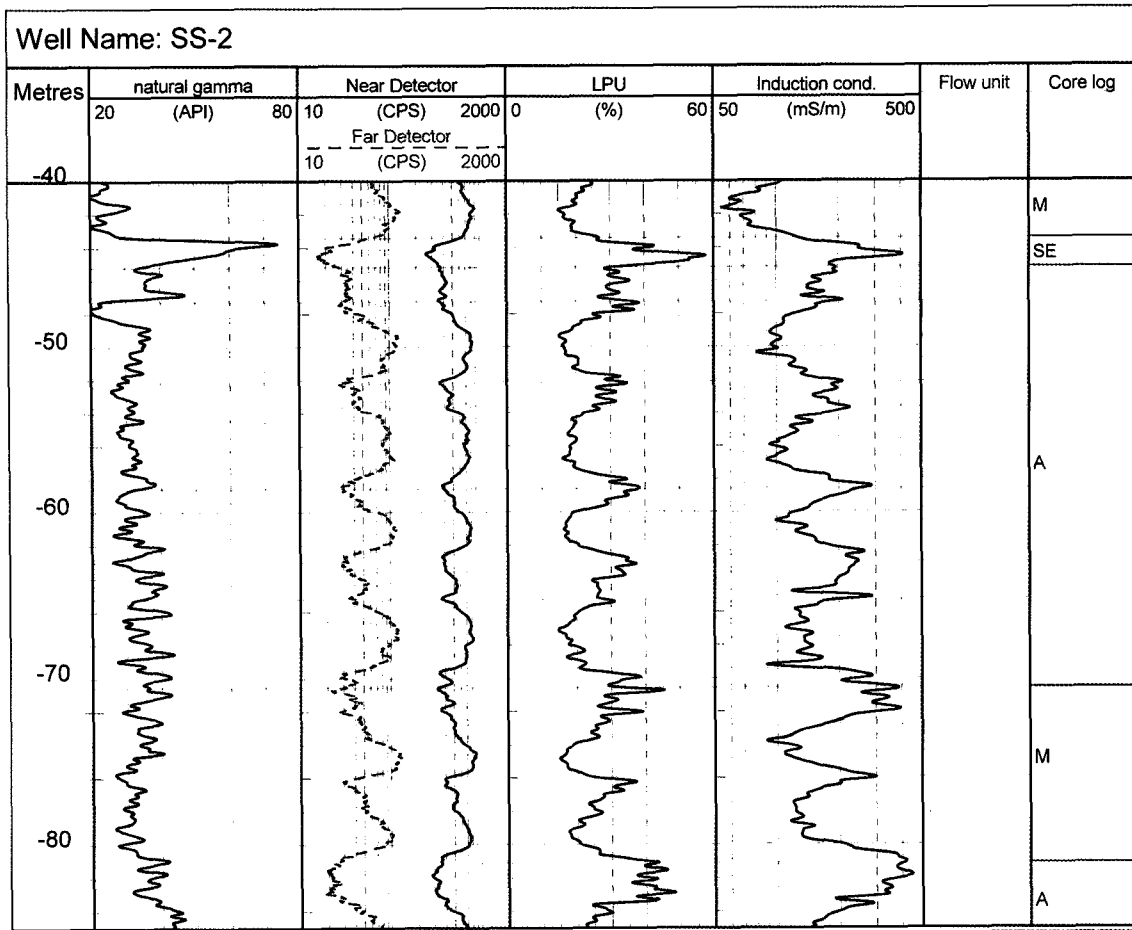


Fig. 3. Geophysical well logs in borehole SS-2. The response of neutron logs (CPS of Near & Far detector, and LPU) and the induction conductivity show the good correlation of the characteristics of basalt flow. Solid line is the lithology boundary and dotted line is the flow unit. Symbol A and M are Trachybasalt and Muljangol basalt, respectively.

물리검층 자료를 해석하였으며 해석의 대상 구간은 지하수위 하부인 포화대 구간이다. 물리검층 자료에서 자연감마선검층은 natural gamma로 표기하며 단위는 API, 공경검층은 caliper로 표기하며 단위는 inch, 감마-감마(밀도)검층으로 측정된 체적밀도는 density로 표기하며 단위는  $g/cm^3$ , 중성자 손데 내에 근거리와 원거리에 위치하는 중성자검출기에서 측정된 계수율은 Near Detector와 Far Detector로 표기하며 단위는 CPS (Count Per Second), 중성자검층으로 측정된 총공극률은 LPU로 표기하며 단위는 %, 단노말 및 장노말 검층은 short normal 및 long normal로 표기하며 단위는 ohm-m, 단극저항(Single Point Resistance)검층은 SPR로 표기하며 단위는 ohm, 전자유도검층으로 측정된 전기비저항은 Resistivity로 표기하며 단위는 ohm-m, 공내수의 온도 및 전기전도도검층은 temperature 및 fluid cond.로 표기하며 단위는  $^{\circ}C$ 와  $\mu S/cm$ ,  $\nabla$ 는 물리검층 수행당시의 수위를 의미한다. 코어로그 표기에서 A는 침상현무암(Acicular basalt)으로 높은 온도와 낮은 점성을 갖는 pahoehoe 용암에서 형성된 암석이며 다량의 기공과 표면이 매끄러운 특징이 있다. W는 왕이메조면현무암(Wangime trachy-

basalt)으로 pahoehoe와 aa 용암의 중간 성격을 갖는 용암에서 형성된 암석으로 '왕이메조면현무암'이란 표기는 가장 쉽게 알아 볼 수 있는 암석이 산출되는 지역을 암석 이름에 붙여 작명한 것이다(박기화 등, 2003). 박기화 등(2004)에는 W 표기를 감람석현무암으로 정의하고 있으나 삼영 1호공 지역에서 산출되는 시추코어는 조면현무암의 특징을 보여 왕이메조면현무암으로 기재하였다. M은 물장울조면현무암(Muljangol trachybasalt)으로 aa성 용암에 형성된 암석이며 두꺼운 클링커를 형성하는 것이 특징이다. TR은 조면암(Trachyte)으로 점성이 매우 높은 용암에서 형성된 암석이며, SE는 퇴적층으로 화산활동이 정지되었던 시기에 퇴적된 것으로 역질 또는 이질로 구성되어 있으며 굳지 않은 화산회가 빗물에 씻겨서 고지형의 계곡에 퇴적된 것이다. H는 수중화산쇄설성퇴적층(Hyaloclastite)으로 용암이 분출되어 바닷속으로 흘러들어 가면서 급히 식어 투명한 작은 알갱이로 산산조각나면서 생성된 것이며 수중화산쇄설성퇴적층은 분출 당시의 해수면을 지시하기도 한다(박기화 등, 2004).

Fig. 3은 수산 2호공에 대한 물리검층 자료 중의 일부 구간

으로 전자유도검층(Induction cond.으로 표기했으며 단위는 mS/m)은 2002년 6월 굴착과 동시에, 증성자(Near and Far Detector, LPU) 및 자연감마선(natural gamma)검층은 2004년 7월에 취득하였다. Fig. 3의 물리검층 자료 중에서 자연감마선 검층이 높은 심도 114.4~116 m 구간은 퇴적층(SE) 구간이며 침상현무암(A) 및 물장울조면현무암(M) 구간에서는 자연감마선의 변화도 작으며 절대 값도 30~40 API 사이로 매우 작은 것을 알 수 있다. Fig. 3에서 지층의 경계는 푸른색 실선으로, 동일 지층 내에서 용암의 누층단위는 붉은 점선으로 표기하였다. 지층 경계는 코어로그를 이용하였으며 동일 지층내의 용암의 누층 구분은 증성자검층 및 전자유도검층으로 측정된 물성 변화에서 해석된 결과이다. 이미 앞에서 기술한 바와 같이 현무암 내에서 자연감마선검층은 지층의 경계나 용암의 누층 경계에서 변화가 없으며 퇴적층 구간에서는 주변 현무암에 비하여 상대적으로 높은 자연감마선을 보이고 있다. 퇴적층 구간의 높은 공극률과 전기전도도는 자연감마선이 높은 구간과 잘 일치하여 이들 물리검층 반응들은 퇴적층의 구분에 효과적임을 알 수 있다.

현무암 구간에서 물성 변화와 용암의 누층과의 관계는 다음과 같이 설명할 수 있다. 용암이 분출하고 유동하면서 내부는 서서히 굳으면서 치밀하여 공극률이나 전기전도도가 작으며 공기나 지표와 접촉하는 구간에서는 빠르게 굳으면서 많은 알갱이가 형성되어 상대적으로 공극률이나 전기전도도가 증가한다. Fig. 3에서 중앙의 침상현무암(A)은 낮은 공극률과 전기전도도를 보이는 구간이 총 4개이고 하부의 물장울조면현무암(M)은 총 2회의 구간이 존재하여 각 지층내의 개별적인 용암 누층을 해석할 수 있으며 이와 같은 해석결과는 지질 코어로 검증도 잘 일치한다. 물리검층과 코어로그를 비교할 때, 심도의 불일치가 존재하기도 하는데 이와 같은 심도의 차이는 코어회수율에 의한 것으로 판단된다. 수산 2호공에서의 심도오차는 다음과 같다. 퇴적층의 구간은 코어로그의 경우 119~125 m 이나 물리검층으로 확인된 구간은 114.4~116 m이고 물장울조면현무암 구간은 현무암의 경우 140~152 m, 물리검층의 경우는 141.5~151.9 m이다.

제주 북부의 삼양 1호공 및 서부의 용수 1호공에서는 좀더 다양한 물리검층 자료를 획득하였다. Fig. 4는 용수 1호공(Yongsu-1)에 대한 물리검층 결과로 침상현무암(A)과 수중화산쇄설성퇴적층(H), 퇴적층(SE)이 물리검층 자료에서 잘 구분됨을 알 수 있다. 자연감마선검층의 경우, 퇴적층(SE)은 높은 감마선을 보여 쉽게 구분이 되지만 자연감마선의 변화가 작은 침상현무암(A)이나 수중화산쇄설성퇴적층(H)의 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.

증성자검층으로 추정된 공극률은 매우 복잡한 양상을 보여

주고 있다. 전반적으로 침상현무암(A)은 낮은 공극률에서 높은 공극률까지 넓은 범위를 보이며, 수중화산쇄설성퇴적층(H)은 전반적으로 높은 공극률을 보이고 있다. 심도 약 20 m 하부에 존재하는 2개의 침상현무암(A)은 공극률의 변화에서 3~4회의 용암 누층이 있는 것으로 판단된다. 전기비저항은 시추공의 영향을 작게 받는 장노말을 기준으로 침상현무암(A)은 약 2,000 ohm-m 이상의 전기비저항을 보이며 수중화산쇄설성퇴적층(H)보다 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 전자유도검층으로 측정된 전기비저항은 수산 2호공과 동일하게 퇴적층(SE)과 수중화산쇄설성퇴적층(H)에서는 수십 ohm-m의 전기비저항을 나타내며 침상현무암(A)구간에서는 용암의 분출과 관련된 전기비저항의 변화를 잘 반영하고 있다. 동일한 침상현무암(A)에서 공극률이 높은 구간에서 전기비저항과 밀도가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 심도 약 20 m 하부에 위치하는 2개의 침상현무암(A)은 증성자검층, 감마-감마(밀도)검층과 전자유도검층 자료를 기준으로 최소 3회 이상의 용암 분출(또는 유동)이 있었던 것으로 해석된다. 높은 공극률, 낮은 밀도, 낮은 전기비저항을 보이는 수중화산쇄설성퇴적층(H)은 용암이 물(바닷물)과 만나 급격히 냉각하면서 생성되기 때문에 높은 공극률을 보이며 지하수 유동(해수침투 포함)의 주요 통로 역할을 한다. 퇴적층(SE)은 주로 점토성분의 영향으로 높은 자연감마선과 높은 공극률(실제 공극률이 높은 것이 아니라 점토성분에 의해 높게 측정됨), 낮은 밀도와 낮은 전기비저항 특성을 갖는다. 용수 1호공에서의 온도검층 자료는 두개의 수중화산쇄설성퇴적층(H) 구간을 중심으로 온도변화율이 작은데 심도에 따른 온도변화가 작은 것은 수직의 지하수 흐름을 반영하는 것으로 해석하면 두 개의 수중화산쇄설성퇴적층(H)이 주요 대수층의 역할을 하고 두 지층 사이에 지하수의 유동이 있음을 추정할 수 있다. 공경검층 자료에서 자료가 없는 30.4~36.5 m 구간은 자료의 신뢰도가 낮아 삭제한 구간이다.

Fig. 4와 같이 동일한 지층에서도 물성변화가 크기 때문에 대표물성을 결정하는 것은 어렵지만 두개의 침상현무암(A)과 수중화산쇄설성퇴적층(H)의 구간 물성을 정리하면 Table 1과 같다. 자연감마선은 암상의 변화와 관계없이 평균적으로 26~30 API의 범위를 나타내며 침상현무암(A) 구간의 평균 밀도는 약 2.60 g/cm<sup>3</sup>, 평균 공극률은 31%, 평균 전기비저항은 약 308 ohm-m 정도이며 수중화산쇄설성퇴적층(H) 구간의 평균 밀도는 2.25 g/cm<sup>3</sup>, 평균 공극률은 49%, 평균 전기비저항은 53 ohm-m 정도이다.

Fig. 5는 용수 1호공의 시추코어로 Fig. 5(a)에서 20 m로 표기된 왼쪽 부분은 퇴적층(SE)이며 Fig. 5(b)에서 심도 49 m의 왼쪽과 66 m의 오른쪽 부분은 수중화산쇄설성퇴적층(H) 구간이다.

Fig. 6은 삼양 1호공에 대한 물리검층 결과로 용수 1호공에서 기술한 바와 같이 자연감마선검층, 증성자검층, 감마-감마(밀도)검층, 전기비저항 등의 물리검층 반응과 코어로그가 잘

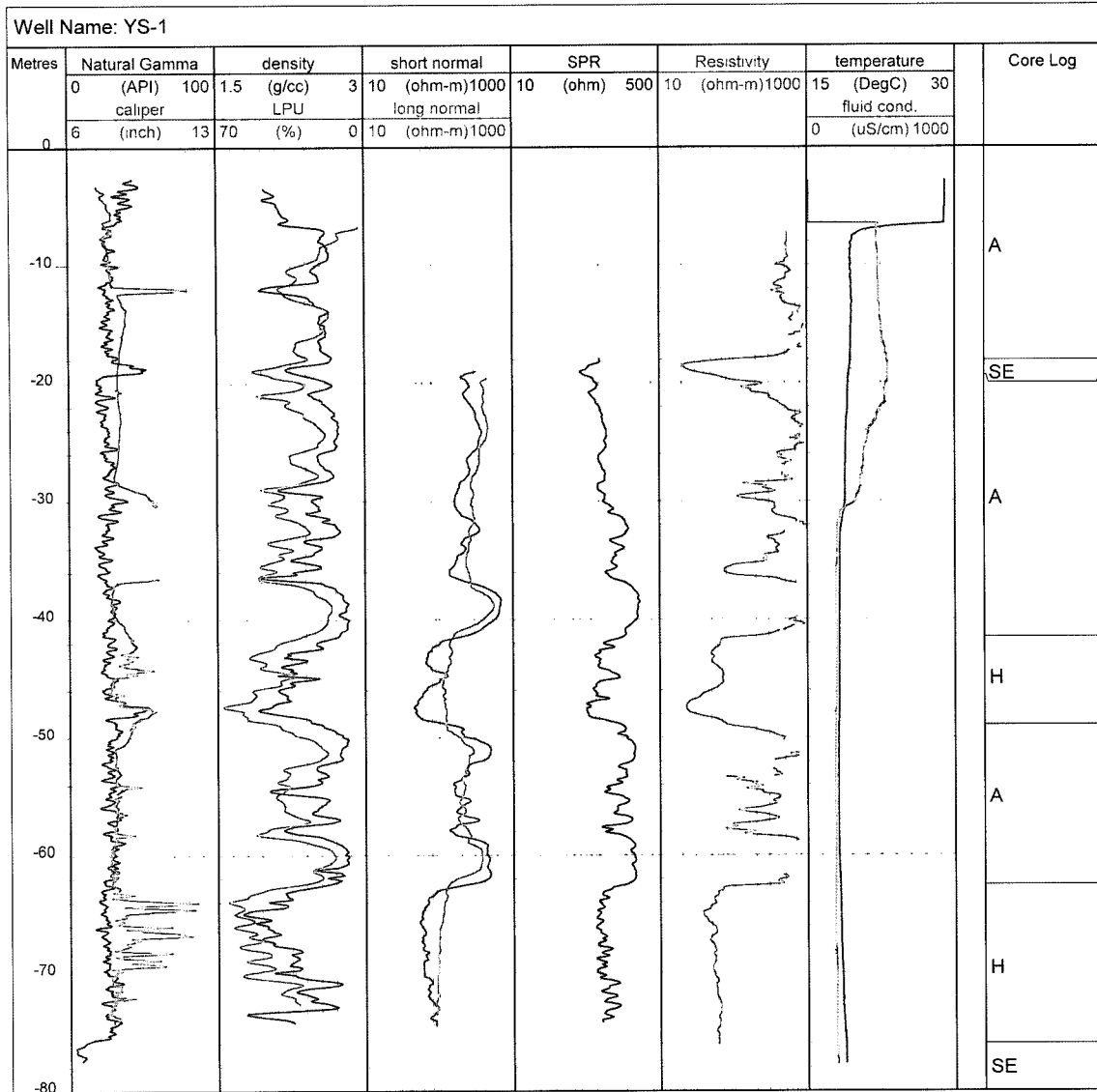


Fig. 4. Geophysical well logs in borehole YS-1. Sedimentary and hyaloclastite show that the resistivity and density are low, and the porosity is high. The intensity of natural gamma is high in the sedimentary interval at the depth of about 19 m.

Table 1. *in situ* physical properties measured by geophysical well logs in borehole YS-1.

Core log	Depth interval (m)	Natural gamma (API)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Neutron porosity (%)	Induction resistivity (ohm-m)
		mean (min. ~ max.)	mean (min. ~ max.)	mean (min. ~ max.)	mean (min. ~ max.)
Trachybasalt	19.4 ~ 41.5	26	2.59	32	366
		17 ~ 39	1.92 ~ 2.83	16 ~ 58	78 ~ 912
Hyaloclastite	41.5 ~ 49.0	30	2.28	49	51
		21 ~ 54	1.92 ~ 2.65	31 ~ 71	23 ~ 153
Trachybasalt	49.0 ~ 62.5	29	2.61	30	250
		20 ~ 37	2.03 ~ 2.83	14 ~ 57	76 ~ 757
Hyaloclastite	62.5 ~ 72.7	26	2.21	49	56
		16 ~ 35	1.75 ~ 2.75	30 ~ 64	38 ~ 67

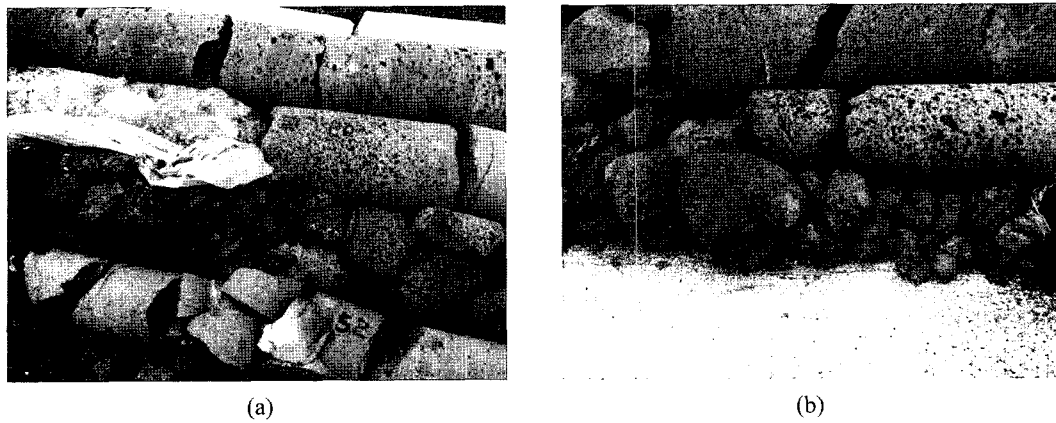


Fig. 5. Photographs of drill cores in borehole YS-1. (a) The left part at the depth of 20 m is the sedimentary, (b) The left part at the depth of 49 m and the right part at depth 66 m are hyaloclastite.

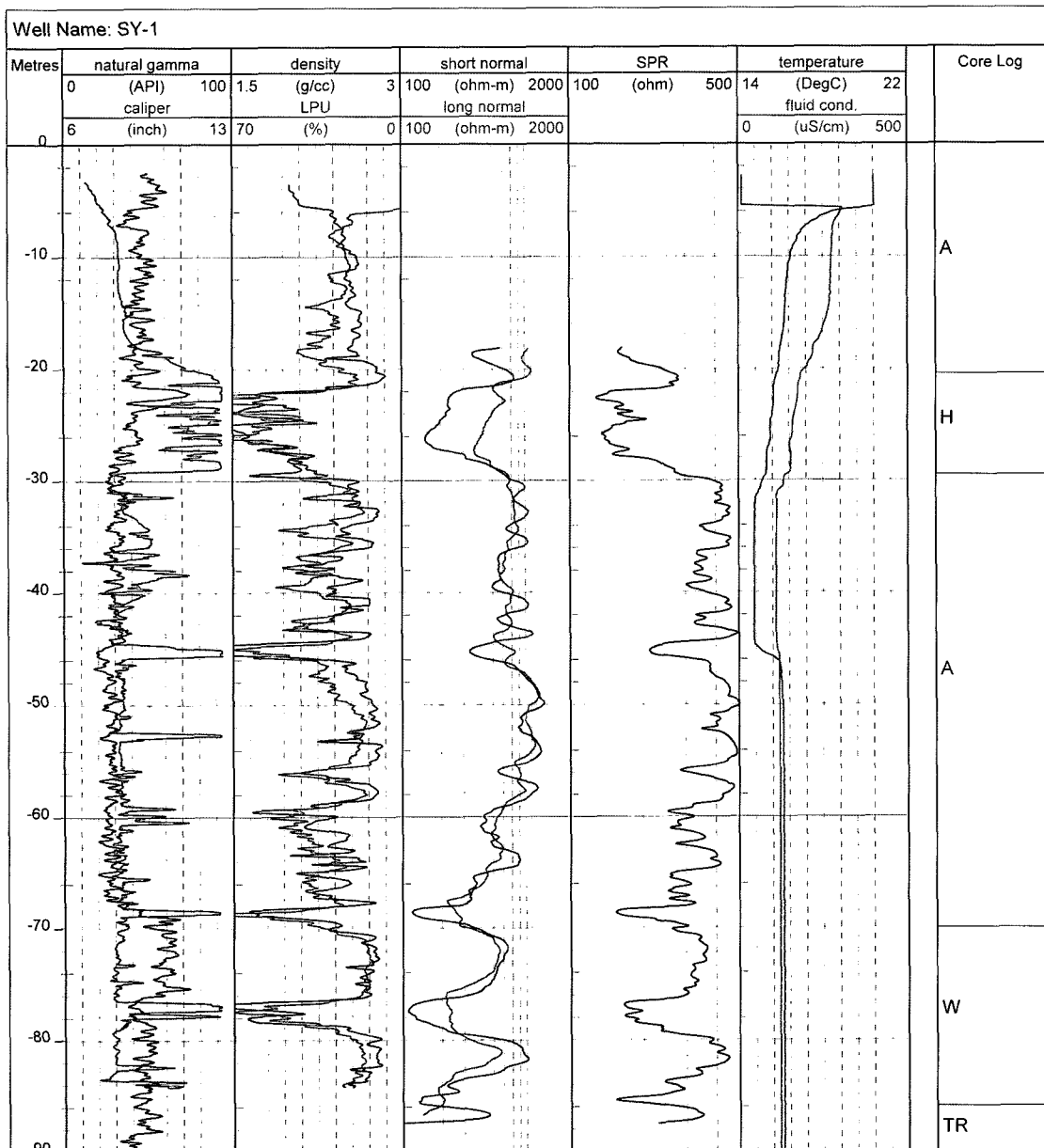
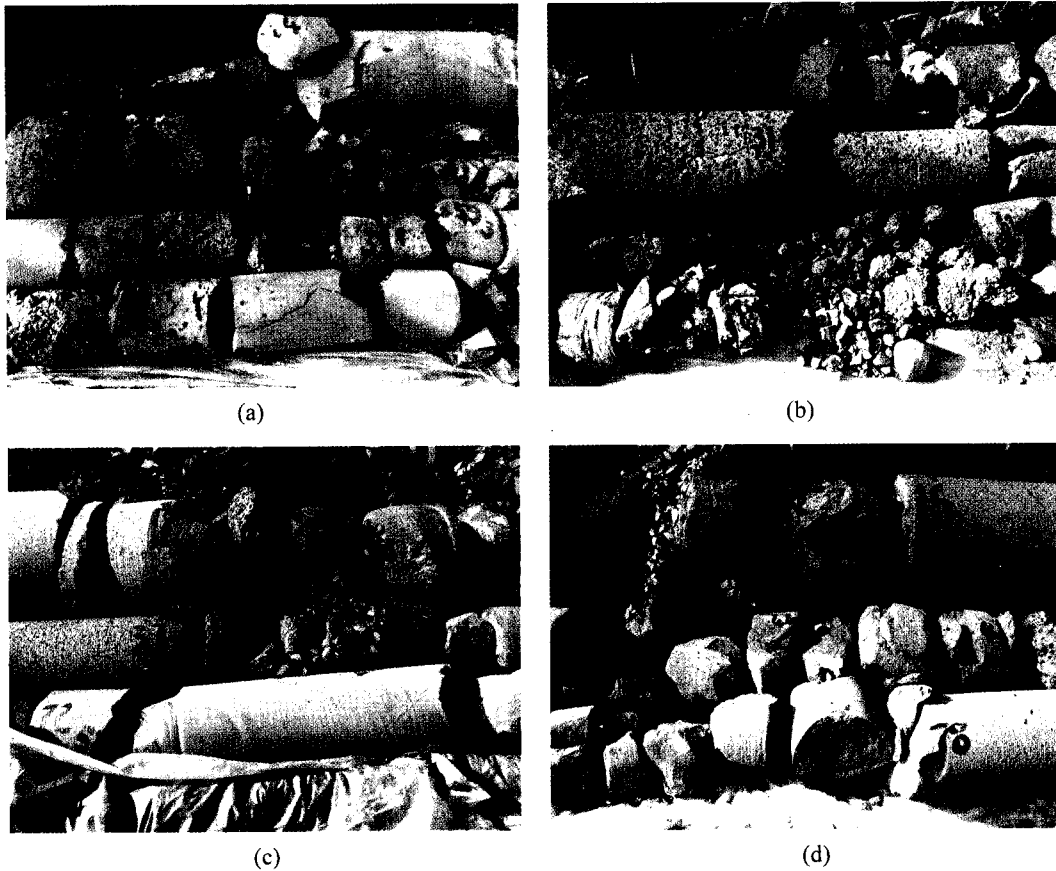


Fig. 6. Geophysical well logs in borehole SY-1. Symbol W and TR are acicular basalt, and trachy rock, respectively.





**Fig. 7.** Photographs of drill cores in borehole SY-1. (a) Hyaloclastite at the depth of 22 ~ 24 m shows the low resistivity & density, and high porosity but almost drill cores are lost, (b) Trachybasalt at the depth of about 31 m shows the low porosity, (c) Trachybasalt at the depth of 37 ~ 39 m shows the signatures of basalt flow grading from a more porous to massive flow, and (d) the fractured trachybasalt at the depth of 41.8 ~ 45.8 m also shows the low porosity.

일치하고 있다. 수중화산쇄설성퇴적층(H) 구간이나 용암의 분출 경계면에서 높은 공극률과 작은 전기비저항 및 밀도 값을 보이며 이들 구간은 코어의 회수율이 낮아 지하수의 유동 역할을 하는 것으로 판단된다. Fig. 7은 삼양 1호공의 시추코어 사진으로 물리검층 반응 중에서 공극률이 높고 밀도와 전기비저항이 작은 구간을 중심으로 정리한 것이다. 동일한 지층이라도 균열(또는 공극률)의 정도에 따라서 물성이 변하며 특히, 공극률의 높은 구간에서는 코어의 회수율이 낮은 것을 알 수 있다. Fig. 7(a)는 22 ~ 24 m 구간은 수중화산쇄설성퇴적층(H)으로 시추코어의 회수율이 매우 작은 것을 알 수 있으며 Fig. 7(b)는 심도 31 m 부근의 침상현무암(A)으로 심도가 증가하는 부분이 치밀해지는 것을 있으며 이와 같은 것은 물리검층 자료의 밀도 증가와 공극률 감소하는 경향과 잘 일치하고 있다. Fig. 7(c)는 침상현무암(A)의 심도 37 ~ 39 m 구간으로 용암의 균기 정도에 따라 기공의 분포가 다른 것을 알 수 있으며 이들 구간에서의 밀도와 공극률, 전기비저항도 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 7(d)는 침상현무암(A)의 심도 41.8 ~ 45.8 m 구간으로 코어회수가 낮으며 공경검층, 매우 작은 밀도 및 공극률에서 소규모의 공동이나 극심한 파쇄대가 존재하는 구간이다.

## 결론

화산섬인 제주도에서 용암분출과 관련된 물리검층 자료의 해석을 위하여 다양한 물리검층을 수행하였다. 지하수위 하부인 포화대 구간에서의 물리검층 반응은 용암의 누층과 관련된 반응이 뚜렷이 확인되었으며 특히, 중성자검층, 감마-감마(밀도)검층 및 전기비저항검층 자료에서 뚜렷하였다. 이와 같이 물리검층의 반응이 뚜렷한 것은 분출된 용암이 흐르면서 외부와 노출된 부분은 급격하게 굳으면서 많은 기공이나 균열이 발생하여 높은 공극률과 낮은 전기비저항과 밀도를 나타내며 서서히 굳는 안쪽은 구성이 치밀하여 높은 전기비저항과 밀도, 그리고 낮은 공극률을 나타냈기 때문이다. 용암이 분출하면서 바닷물과 만나서 형성되는 수중화산쇄설성퇴적층은 높은 공극률, 낮은 전기비저항과 밀도를 나타내며 시추시 코어의 유실이 많은 구간이기도 하다. 용수 1호공에 대한 물리검층 결과, 침상현무암과 수중화산쇄설성퇴적층의 자연감마선은 암상의 변화와 관계없이 26 ~ 30 API의 범위를 나타내며 침상현무암 구간의 평균 밀도는 약 2.60 g/cm<sup>3</sup>, 평균 공극률은 31 %, 전기비저항은 약 308 ohm-m 정도이며 수중화산쇄설성퇴적층 구간

의 평균 밀도는  $2.25 \text{ g/cm}^3$ , 평균 공극률은 49 %, 평균 전기비저항은 53 ohm-m 정도이다. 제주도 지역에서 수행한 물리검층 자료는 지질학적인 반응을 잘 반영하고 있어 물리검층의 적용성이 높은 것으로 판단된다. 제주도에 있어 취득한 물리검층 자료는 제주도 지하수자원의 부존량 평가, 지하수 유동과 지질학적 특성과의 관계, 그리고 동부지역의 해수침투 현상에 대한 연구 등에 유용하게 이용될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '제주도 지하수 부존특성에 대한 지구과학적 해석' 과제의 일환으로 수행되었으며 이 논문의 오류와 미비한 점을 지적하여 주신 익명의 심사자에게 감사드립니다. 자료취득 과정에 많은 도움을 준 광역수자원본부 박윤석 선생님과 제주도 농업기반공사의 김창욱 선생님, 물리검층 장비 유지보수에 많은 도움을 한국지질자원연구원 성낙훈 선생님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 박기화, 이봉주, 한만갑, 김정찬, 기원서, 박원배, 김태윤, 2003, 제주도 지질여행, 한국지질자원연구원, 제주발전연구원, p179.
- 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, 일반-04(연차)-02, p214.
- 송윤호, 정승환, 이상규, 김정호, 황세호, 황학수, 이성곤, 조성준, 이명중, 설순지, 박인화, 2000, 지반 물리탐사 연구, 한국지질자원연구원, 1999-R-TI02-P-01, p111.
- 이상규, 황세호, 이태섭, 구성본, 최중호, 박인화, 김광은, 송윤호, 성낙훈, 성기성, 이진수, 진명식, 지세정, 이동영, 김주용, 양동윤, 성익환, 최순학, 조병욱, 김민규, 박철환, 박연준, 최성웅, 박찬, 이현철, 김태유, 양문희, 오경준, 박경민, 김연배, 송영수, 채효석, 백길남, 송승엽, 오세영, 1996, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용방안 연구(III), 통상산업부, p473.
- 제주도, 2001, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(I), p378.
- 제주도, 2002, 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(II), p343.
- 황세호, 이상규, 1999a, 물리검층자료의 불확도 감소와 수직분해능 향상을 위한 자료처리, 대한지구물리학회 제2차 정기총회 및 학술발표회, 대한지구물리학회, 한국자원연구소, 29-30.
- 황세호, 이상규, 박인화, 황학수, 1999b, 물리검층의 품질관리 대한자원환경지질학회 · 한국자원공학회 · 한국지구물리탐사학회 춘계공동학술발표회(동북아광상성인 심포지움), 330-332.
- 황세호, 박찬, 이상규, 신희순, 2000, 소구경 시추공에서의 밀도검층, 한국자원공학회 · 대한자원환경지질학회 · 한국지구물리탐사학회 춘계 공동학술발표회 논문집, 한국자원연구소, 298-300.
- 황세호, 이상규, 박인화, 박중권, 한경수, 유인걸, 2001, 자연감마선검층의 자료처리 및 활용, 대한자원환경지질학회 · 한국자원공학회 · 한국지구물리탐사학회 · 대한지질학회 2001년도 춘계 공동학술발표회 논문집, 한양대학교, 100-103.
- 황세호, 신제현, 박권규, 박윤성, 이상규, 조철현, 2004, 감마-감마(밀도)검층의 품질관리, 대한지구물리학회 · 대한물리탐사학회 공동학술대회 논문집, 32-39.
- 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., and 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., and Uhlig, S., 1998, Drilling deep into young oceanic crust, Hole 504B, Costa Rica Rift., *Rev. Geophys.*, **27**, 79-102.
- Brogli, C., and 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., and 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., and 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.
- Hearst, J. R., Nelson, P. H., and Paillet, F. L., 2000, *Well logging for physical properties, A handbook for geophysicists, geologists, and engineers*, John Wiley & Sons Ltd., p483.
- 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., and 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., and Singh, B. K., 1982. Groundwater in the Deccan basalts of the Betwa basin, India, *J. Hydrol.*, **58**, 276-306.