



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

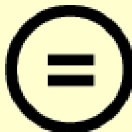
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

김 영 화 교 수 지 도
이학석사 학위논문

제주도 화산암에서의
감마검층 자료 분석 연구

AN ANALYTIC STUDY
ON THE GAMMA LOG DATA
OBTAINED FROM JEJU VOLCANIC ROCKS

강원대학교대학원

지구물리학과

심 규 성

심규성의 석사 학위논문을
합격으로 판정함

2015년 12월

심사위원장	장	보	안	인
위	원	김	영	화
위	원	황	세	호

제주도 화산암에서의 감마검층 자료 분석 연구

심 규 성

강원대학교 대학원 지구물리학과

제주도 일대 29개의 시추공에서 수집된 감마검층 자료를 사용하여 제주도 지역 화산암의 감마 분포 특성과 암종별, 지역별, 분출시기별 감마강도 특성을 분석하였다. 감마선 총량을 측정하는 전성분 감마검층 자료에 의한 제주도 화산암의 감마선 강도 분포는 20~90API 범위로 나타났다. 제주도 화산암의 감마 분포 특성 분석 결과, 지역적으로 감마검층 자료가 존재하지 않는 남 구역을 제외하고 동, 북, 서, 중앙의 4개 구역이 각기 화산암의 감마특성을 달리하는 것으로 나타났다. 전반적으로는 중앙고지대에서 상대적으로 높은 감마강도를 보이며 해안 저지대 쪽으로 갈수록 감마값이 점차 감소하는 경향이 나타난다. 이러한 경향은 제주도의 화산암 분출시기와 암상 차이를 반영하는 것으로 해석된다. 제주도 지역에서의 감마 특성 연구는 지층 구분에서 매우 효과적인 것으로 나타났으며 특히 시추공 감마검층 자료에 의한 화산암의 층서 구분에 매우 유용함이 확인되었다.

□ 핵심주제어: 자연감마, 전성분 감마검층, 제주도 화산암, 감마강도, 감마 분포

목 차

List of Tables	iii
List of Figures.....	iv
I. 서론	1
II. 지질	4
1. 광역지질	4
2. 지질각론	5
3. 시추공 지질	6
III. 자료 및 해석방법	8
IV. 전반적인 감마 분포 양상	10
1. 감마점층곡선의 유형과 지역적 특성	10
2. 감마단면과 층서단면	15
3. 시추공별 평균 감마강도 분포	25
V. 화산암의 감마강도 특성 분석	28
1. 암종별 감마강도	28
2. 구역별 감마강도	28
3. 분출시기별 감마강도	29
VI. 토의	33
VII. 결론	37

참고문헌	38
영문초록	41
감사의 글	43

List of Tables

Table 1. Averaged gamma strength grouped by lithology for the whole Jeu volcanic rocks.....	28
Table 2. Averaged gamma strength grouped by four regions.....	29
Table 3. Averaged gamma strength grouped by geological time in eastern(E)	31
Table 4. Averaged gamma strength of volcanic rocks grouped by geological time and lithology in Jeu Island.....	32
Table 5. Averaged gamma strength of volcanic rocks grouped by geologicaal time and region.....	32

List of Figures

Fig.1. Location map for gamma logging wells.....	9
Fig.2. Four typical gamma logging curves obtained from the Jeju area.....	11
Fig.3. Comparison between the four regions grouped by the type of gamma logging curve(A) and the four zones grouped by lithological properties(B). Figure B was modified after Koh, 2013.....	13
Fig.4. Comparison between the gamma section (A) and the lithological and chronological section (B) constructed on Handong 4-3-1 boreholes. The lower figure (B) was modified after Koh et al.(2008).....	18
Fig.5. Comparison between the gamma section (A) and the lithological and chronological section (B) constructed on Jongdal 5-4-3-2-1 boreholes. The lower figure (B) was modified after Koh et al.(2008)	20
Fig.6. Comparison between the gamma section (A) and the lithological and chronological section (B) constructed on Susan 4-3-2-1 boreholes. The lower figure (B) was modified after Koh et al.(2008).....	22
Fig.7. Comparison between the gamma section (A) and the lithological and chronological section (B) constructed on Hacheon 4-3-2-1 boreholes. The lower figure (B) was modified after Koh et al.(2008).....	24
Fig.8. Distribution of the averaged gamma strength of volcanic rocks in Jeju island.....	27

I. 서 론

암석에 포함된 방사능 동위원소는 방사능 물질의 붕괴에 의하여 감마선을 방출하는 특징을 가지고 있으며 암석 또는 광물에 따라 감마선의 강도와 종류가 달리 나타난다. 따라서 지층 감마선을 측정하면 지질의 분포 상태나 구조, 유용광물의 존재 등을 밝히는데 효과적으로 사용될 수 있다. 지질학적 층서구조에서의 자연감마 검층은 반세기 이상 측정되어왔으며(Serra, 1984) 1970년대는 항공감마탐사 및 감마검층 방법의 성분별 감마탐사가 소개되었다(Grasty, 1975; Marett et al., 1976; Serra et al., 1980; Mathis et al., 1984). 1980년대 초반, 감마검층은 주로 세일함량(shaliness)을 평가하기 위한 총량 감마검층이 주로 사용되었다. 이러한 탐사는 방사능 동위원소의 자연붕괴를 이용한다는 관점에서 방사능탐사라고 하며, 그 중 감마선을 이용한 탐사 방법을 감마탐사라고 한다. 감마탐사는 감마선 검출기를 사용하여 지층이 방출하는 감마선의 강도와 유형을 측정하고 분석함으로써 감마선을 방출하는 지층의 분포 상태나 암종, 구조 등을 밝히는 탐사방법이다. 감마탐사는 감마선을 발생시키는 3개의 주요 방사성원소인 우라늄, 토륨, 칼륨의 성분을 구분해서 측정하는 스펙트럴 감마탐사(성분별 감마탐사)와 전체 총량을 측정하는 일반 감마탐사(전체성분 감마탐사)로 구분된다.

감마탐사는 지표면에서 방출되는 감마선을 육상에서 측정하는 지표탐사와 항공기에 탑재된 검출기를 이용하는 항공탐사 그리고 시추공을 이용하여 직접 암석에 밀착하여 측정하는 감마검층으로 구분된다. 지표탐사와 항공 감마탐사는 넓은 지역에 대하여 일반적이고 쉽게 접근할 수 있는 탐사방법이나 탐사에 이용되는 감마선의 짧은 암석 투과능력(Mussett and Khan, 2000) 때문에 표층의 영향이 주로 나타난다. 항공 방사능탐사는 넓은 면적에 대하여 신속한 자료획득이 가능할 뿐만 아니라, 중자력탐사나 전자탐사 등의 자료와 함께 획득할 수 있어 활용빈도가 높은 탐사방법

이다(Zeller et al., 1990; Shin et al., 2013). 항공 방사능탐사는 항공기를 이용한다는 차이만 있을 뿐 지표탐사와 그 원리가 동일하기 때문에 지표탐사에서와 마찬가지로 짧은 투과심도의 문제점을 가지고 있다. 감마탐사의 짧은 투과심도는 자연적 또는 인위적으로 이동된 표층의 영향이 잘못 측정되기도 하며 측정 결과가 감마선 검출기의 특성에 좌우되는 문제점을 나타내기도 한다(Mussett and Khan, 2000). 우리나라에서는 전체 면적의 약 50%에 대하여 항공감마탐사가 수행되었으며, 특히 경상분지와 태백산 지역에서 집중적으로 수행되었다(Koo et al., 1997).

반면 감마검층은 시추공 내에서 검출기가 직접 지층과 밀착 또는 인접하여 측정되는 방식이기 때문에 지표탐사에서의 짧은 탐사심도 문제가 해결될 뿐만 아니라 지표면 감마탐사에서 나타나는 표토층의 용탈과 이동, 재퇴적에 의한 왜곡된 탐사정보 획득이(Rogers et al., 1978) 거의 없다는 장점을 가진다. 감마검층 방법에서도 검출기의 반응 특성에 따라 측정 값이 다른 문제점은 여전히 남아 있으나 검출기 특성에 대한 보정 및 상호보완이 가능한 장점을 가지고 있다.

화성암 중에서는 화강암과 유문암이 대표적인 고감마 암석이며, 점토 광물을 많이 포함하고 있는 퇴적암도 고감마 값을 나타낸다. 증발암들도 자연감마선은 많이 방출한다(Serra, 1984). 특히 퇴적암에서의 우라늄, 토륨, 칼륨의 상대빈도는 점토성분 및 퇴적환경, 숙성작용과정을 추정할 수 있다(Serra et al., 1980; Serra, 1984, 1986). 국내의 경우 감마선 성분별 측정기법이 거의 이루어지지 않았으며, 지질해석에 절대적으로 유리한 스펙트랄 감마탐사 결과(Serra, 1984; Dickson and Scott, 1997; McCafferty and Van Gosen, 2009)를 이용하지 못하고 전체 감마강도를 이용한 지층의 특성분석이 이루어져 왔다.

Park et. al.(2014)은 국내에서 측정한 감마선을 표준단위로 산출하여 한반도 남쪽 지역에서의 전체성분 자연감마 강도분포를 구하고 암석의 성인 및 암종별 감마강도 특성을 제시하였으며, 감마 이상대의 방향이 한반도 남쪽에서의 지질분포 및 구조와 좋은 상관관계가 있음을 보고하였다.

본 논문에서는 제주도 지역을 대상으로 감마검층기로 얻어진 감마자료를 수집하고 분석하여 제주도 화산암의 감마강도 분포상태와 주요 암종별, 구역별, 분출시기별 특성과 연관된 감마특성을 분석하고자 하였다.

II. 지 질

1. 광역지질

제주도 전역에서 이루어진 시추자료에 따르면 제주도의 지하지질은 최하부에 기반암인 쥐라기 내지 백악기 화강암이 분포하고, 그 상부에 미고결층인 신생대 제3기의 U층과 서귀포층, 그리고 용암류가 피복하는 형태로 구성되어 있다(고기원, 1997). U층 상부의 서귀포층은 제주도 동부지역을 제외한 대부분의 지역에서 나타나며, 서귀포층의 상부에는 현무암질에서 조면암질에 이르는 다양한 용암류가 피복되어 있다(이문원외, 1994).

제주도를 형성한 화산활동은 적어도 1.2Ma 이전에서 시작되어 0.025Ma 정도까지 지속되었으며, 크게 4단계의 화산활동으로 구분된다(참고문헌). 1단계는 1.2Ma~0.7Ma 시기로 산방산~서귀포를 잇는 선이 화산활동의 중심이 되어 열하분출을 일으켰으며 최후기에 산방산 등과 같은 조면암류를 분출하였다. 2단계는 0.6Ma~0.3Ma 시기로 표선리현무암(침상현무암)과 같은 암상의 용암을 다량으로 분출하여 현재의 제주도의 규모에 가까운 순상형 화산도가 형성되었다. 2단계의 화산활동은 현재 제주도 장축선상이었다. 3단계는 0.3Ma~0.1Ma 시기로 한라산체 주위에서 장석과 휘석반정이 많은 용암류를 분출하여 한라산체를 형성하였다. 4단계는 0.1Ma~0.025Ma 시기로 백록담의 조면암을 분출하면서 백록담이 만들어지고 장축선상 동·서쪽에서는 장석반정이 거의 없는 현무암류를 분출하여 현재의 해안선 지형을 만들었다(이문원, 1994).

한편 고기원외(2008)는 제주도 동부 저지대 시추공 자료를 이용한 연대측정을 통하여 서귀포층 상부의 화산암을 550~400 Ka(I층), 400~300 Ka(II층), 300~200 Ka(III층), 200~100 Ka(IV층), 100Ka 미만(V층)의 5개 시기로 구분하고 비교적 상세한 층서단면을 제시하였다.

2. 지질각론

가. 침상현무암(A)

주로 제주도 동쪽과 서쪽에 분포한다. 높은 온도와 낮은 점성을 갖는 pahoehoe성 용암에서 형성된 암석으로 다량의 기공을 갖고 있으며 표면이 매끄러운 특징이 있다. 2mm 크기의 장석이 침상으로 나타나며 조면구조를 보이는 것이 이 암석의 특징이다.

나. 감람석현무암(W)

제주도의 동쪽과 서쪽에 분포한다. Pahoehoe성과 aa성의 중간성격을 갖는 용암에서 형성된 암석으로 근원지 가까이에서는 매끄러운 표면을 보이나 멀리 흘러가면서 aa성 용암으로 성질이 바뀌어 많은 양의 크링커를 형성한다. 구성광물은 1mm 크기의 감람석이 산점하는 특징이 있으며, 기공은 2cm 크기로 다소 길게 신장된 양상을 나타낸다.

다. 장석-휘석 조면현무암(D)

대표적인 산출지는 주상절리가 잘 발달된 대포동 지역이다. 제주시와 서귀포시 지역에 분포하며 aa성 용암에 의해 형성된 암석이다. 표면에는 두꺼운 크링커가 형성되어 있다. 구성광물은 다량의 장석과 휘석이 반정으로 산점하는데 장석과 휘석의 함량은 25~30%이며, 그 중에서도 휘석이 두드러지게 많이 함유되어 있다.

라. 휘석-장석 조면현무암(M)

제주도의 지표부에 가장 흔히 분포하고 있는 암석이다. 주로 제주도 동부에 분포해 있지만 서측에도 일부 분포해 있다. Aa형 용암에 의해 형성된 암석으로 두꺼운 크링커를 형성하는 특징이 있다. 7mm 크기의 타형모양을 갖는 투명한 사장석과 10mm 크기의 휘석이 1% 정도 산점하는 것이 특징이다. 휘석과 장석은 곳에 따라서는 3cm크기로 나타나기도 한다.

마. 조면암질암(TR)

한라산 조면암, 산방산 조면암 등이 이에 속한다. 회색 내지 담회색의 암석으로 치밀하고 쪼개짐이 발달해 있는 특징이 있다. 점성이 대단히 높은 용암에서 형성된 것으로 한라산에서 제주시와 서귀포시 쪽으로 넓게

분포한다.

3. 시추공 지질

제주도의 지질을 4개 지역으로 분할하여 살펴보면 다음과 같이 나타난다. 동부지역의 지하지질 분포는 하위로부터 기반암, U층, 제1기에서 제3기에 이르는 3단계의 화산분출물로 구성되어 있으며, U층 직상부와 서귀포층 직상부에 현무암질조면안산암과 조면질현무암이 분포하고 있다. 서귀포층의 깊이는 평균 해수면하 44~112m의 깊이에 분포하고 있다. 종달 및 한동지역은 제주도 전체적으로 가장 깊은 위치에 서귀포층이 분포하고 있으며 해안에서 내륙 쪽을 향함에 따라 전반적으로 분포심도가 상승하는 경향을 나타낼 뿐만 아니라 층후도 두터워지는 양상을 보인다(고기원 외, 2004).

성산읍 일대의 수산 시추공이 위치한 지역의 지질분포는 제주도의 동부와 서부에 주로 분포하는 침상현무암(A)이 분포하고 있으며, 해안에서 내륙쪽으로 갈수록 휘석-장석 조면현무암(M)이 분포한다(수산4호공). 수산리 시추공에서의 수직적인 지질분포는 제주도의 전형적인 지질형성시기를 보여주는 것으로 최하부에 U층이 존재하고 그 상부에 응회암층등 퇴적층이 분포하고 있으며 최상부인 지표면은 침상현무암이 나타나고 있다. 내륙으로 갈수록 지표면의 침상현무암 하부에 휘석-장석 조면현무암이 분포하며 더 내륙쪽인 4호공에서는 지하 약 120~200m사이에 감람석현무암(W)이 나타난다.

구좌읍 일대의 종달 시추공의 경우 지표지질은 해안쪽에서는 감람석현무암(W)이 주 분포하고 있으며, 3호공 및 5호공 등 내륙쪽 시추공에서는 휘석-장석 조면현무암(M)이 나타난다. 또한 표선면 하천 시추공에서의 지표지질은 해안쪽인 1호공에서는 동부지역에 주 분포하는 침상현무암이 분포하며 2,3,4호공 등 내륙으로 가면서 감람석현무암이 나타난다. 구좌읍 한동 시추공의 지질분포는 해안쪽인 1호공에서는 역시 침상현무암이 분포하고 있으며, 3호공 등 내륙으로 가면서 휘석-장석조면현무암, 더 내

륙인 4호공은 감람석현무암이 나타난다.

한편 제주도 북부지역의 지질분포를 살펴보면 조천읍 함덕 시추공에서는 2개공 모두 해안쪽에 근접하여 있고 모두 침상현무암으로 나타나고 있으며, 특히 하부 약 100m까지 본 암이 분포한다. 이밖에 제주시 삼양 시추공에서의 분포지질은 모두 침상현무암으로 나타나며, 같은 제주시 용담 시추공에서는 삼양 시추공과는 달리 휘석-장석 조면현무암(M)이 분포한다. 다만 내륙쪽의 2호공에서는 지표면에 얇게(10m내외) 휘석-장석 조면현무암(M)이 나타나며 그 하부로 장석-휘석 조면현무암(D)이 나타난다. 제주도 서부지역의 지질분포를 살펴보면 애월읍 원종장 시추공의 지표분포암석은 침상현무암(A)이나 그 두께는 매우 얇고(3~5m) 그 하부로 감람석현무암, 장석-휘석 조면현무암 등이 나타난다. 또한 한경면의 용수 시추공 역시 지표분포 암석은 침상현무암이며 수직적 분포 역시 침상현무암이 나타난다. 대정읍의 무릉 시추공 역시 침상현무암이 주로 나타나고 있다.

한편 제주도의 전반적인 수평적인 지질분포를 파악하기 위하여 2개의 방향을 설정하여 지질분포 양상을 알아보았다. 서부에서 북부를 지나 동부로 연결되는 수평적인 지질분포를 시추공 위주로 살펴보면 침상현무암(애월읍 원종장) - 휘석-장석 조면현무암(제주시 용담) - 침상현무암(제주시 삼양) - 침상현무암(조천읍 함덕)의 지질분포가 우세한 것으로 나타난다. 동부 지역 내륙에서 북서-남동 방향으로의 수평적 지질분포는 감람석현무암(구좌읍 한동) - 휘석-장석 조면현무암(구좌읍 종달) - 휘석-장석 조면현무암(성산읍 수산) - 침상현무암(성산읍 수산)으로 연결되는 형태를 보인다.

Ⅲ. 자료 및 해석 방법

연구에 활용된 감마검층자료는 2004년 한국지질자원연구원에서 발간된 미래 제주도 청정지하수 안정적 공급 시스템 구축사업 보고서(한국지질자원연구원, 2004)에 수록된 것으로 29개의 시추공 관련 자료로 구성된다(Fig. 1). 수록된 자료 중에서 감마검층과 시추공 주상도를 주로 이용하였으며 밀도검층, 비저항검층 자료가 참고 되었다. 활용된 모든 감마검층곡선들은 U, Th K를 함께 측정하는 전성분 감마검층의 형태로 획득된 것이다.

제시된 감마검층곡선은 상당수가 굴착시 생성된 부유물질의 침전이나 시추공 붕괴 등에 기인하여 당초 굴착된 시추심도에 크게 미치지 못하는 짧은 검층심도를 보여 결과적으로 U층 또는 서귀포층의 특성은 물론이고 기저퇴적암 상부의 화산암의 특성을 파악하는데 어려움이 있다. 그러나 75미터에서 400 미터의 범위를 보이는 감마검층곡선만으로도 서귀포 상부에 분포하는 화산암의 전반적인 감마 특성 파악에는 크게 무리가 없는 것으로 나타나고 있다.

이러한 관점에서 서귀포층 상부에 분포하는 화산암의 감마검층곡선으로부터 검층곡선의 형태적 특성과 감마강도의 분포특성을 구하고 그 결과를 지역적, 시대적, 암상적 특성과 연계시키는 방식이 적용되었다. 감마검층곡선의 형태적 특성 파악은 심도축이 지질시대와 연관되어 있다는 관점에서 지역적 지질특성의 추적을 목적으로 이루어졌으며 감마강도 분포는 지역적, 시대적, 암상적 특성 연구의 기본 도구로 활용되었다. 감마강도 특성과 연계될 암상자료는 검층보고서(한국지질자원연구원, 2004)의 주상도에서 제시된 광물조성에 기초하여 분류된 암석구분을 주로 적용하였으며 화학성분에 기초하여 분류된 지질별 강도특성과의 비교를 위해서 자료 활용이 가능한 동부 지역에서의 연구결과(고기원 외, 2013)를 이용하였다. 각 시추공에서의 화산암 전체구간, 또는 임의 구간을 대표하는 감마강도

(Gamma Strength, Γ)는 지질주상도와 감마곡선의 형태를 함께 고려하여 결정된 단위 층으로 구분한 후 각 단위 층에서 감마강도(G_i)와 두께(T_i)를 구하고 감마강도와 두께의 가중평균의 형태로(Eq. 1) 산출되었다. 각 단위 층의 감마강도 값은 디지털 감마자료를 구하지 못한 관계로 보고서에서 제시된 감마검층곡선으로부터 층 경계에 의한 어깨효과(shoulder effect)를 제거하고 평균값을 읽는 방법으로 산출되었다. 검층곡선에서 두께가 미치는 영향을 최소화하기 위하여 5미터 미만의 소규모 감마분포는 분석 대상에서 제외되었다.

$$\Gamma strength = \frac{\sum G_i T_i}{\sum T_i} \quad \text{-----} \quad (1)$$

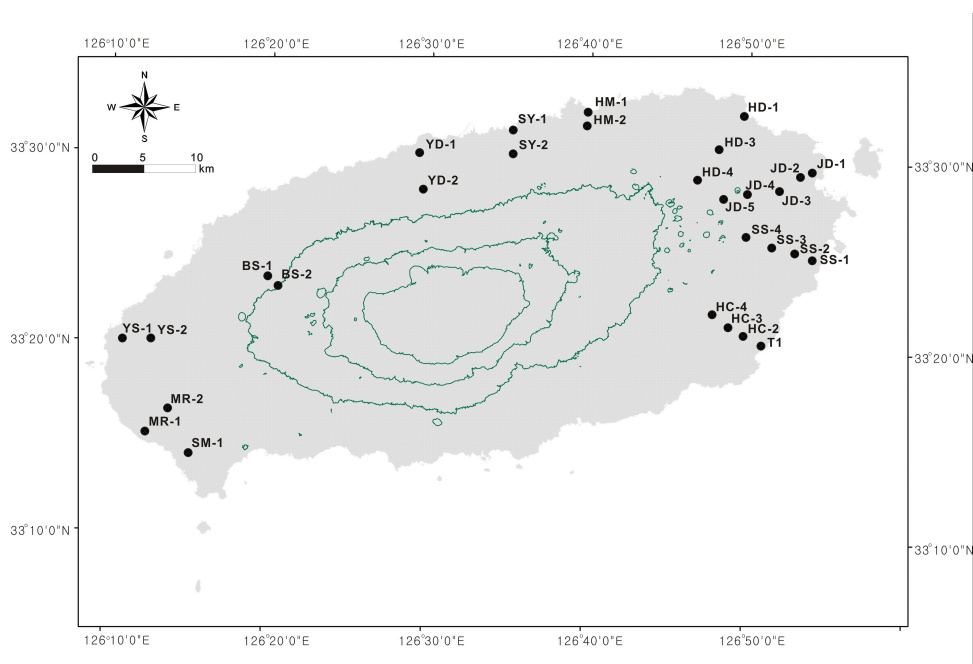


Fig. 1. Location map for gamma logging wells

IV. 전반적인 감마분포 양상

1. 감마검층곡선의 유형과 지역적 특성

29개의 시추공에서 얻어진 감마검층곡선은 10API에서 100API의 범위에 걸쳐 감마강도 변화에 다양한 형태를 보이고 있으나 대체로 인접한 시추공에서의 감마곡선들 사이에는 유사성이 많이 관찰되고 있다. 이는 감마분포가 가지는 지질특성과의 높은 상관성(Keys, 1989)과 함께 감마검층곡선의 형태가 지역 지질특성 연구의 한 보조수단이 될 수 있음을 시사하고 있다. 이러한 관점에서 지역적 특성과의 연계를 목적으로 복잡하게 나타나는 심도에 따른 감마분포의 형태를 단순화시켰다. 그 결과 모든 감마검층 곡선은 심도가 증가함에 따라 감마값이 감소하다 증가하는 유형과 지속적으로 증가하는 유형 및 심도에 따라 특기할 만한 변화가 없는 유형으로 구분이 가능하며, 이는 다시 심부에서의 감마값이 증가 또는 감소하는 양상에 따라 더 세분되는 것으로 나타났다.

그러나 심부에서 나타나는 형태상 차이의 많은 부분은 검층이 수행된 심도 차이에 기인하며 특히 전반적인 고감마 경향을 보이는 서귀포층 또는 U층까지 감마검층이 수행된 여부에 따라 달리 나타나고 있다. 따라서 대상을 서귀포층 상부에 분포하는 화산암으로 국한시키고 일부 불규칙적인 감마반응을 무시하고 감마곡선을 단순화시키면 Fig. 2에 제시된 바와 같이 4개 유형으로 구분될 수 있다. 공통적으로 높은 감마값을 보이는 표층 하부에서 부터 심도가 증가함에 따라 감마값이 단계적으로 감소하다 다시 증가 경향을 보이는 유형이 type 1이며, 심도 증가에 따라 감마값이 점이적으로 감소하는 유형이 type 2에 해당된다. 반면에 심도에 따른 특기할 만한 증감의 경향이 없는 유형이 type 3이고, type 4는 심도에 따라 감마값이 증가하는 유형에 해당된다.

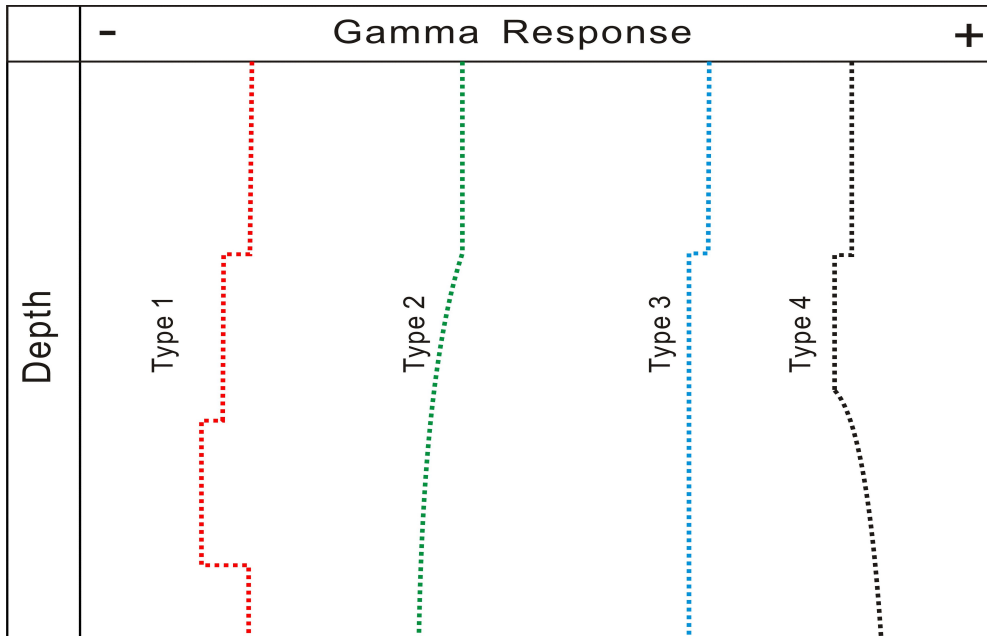


Fig. 2. Four typical gamma logging curves obtained from the Jeju area.

각 유형에 해당하는 검층공의 분포를 보면 type 1에 해당하는 감마검층곡선의 형태는 시추공 JD-1,2,3,4호공을 비롯하여 SS-1,2,3,호공 그리고 HC-1,2,3,호공, HD-3호공에서 관찰된다. 반면에 type 2는 HD-1, HM-1, HM-2, SY-1 시추공에서, type 3은 WJ-1, WJ-2, YD-2, HD-4, JD-5, HC-4 시추공에서, 그리고 type 4는 YS-1, YS-2, MR-1, MR-2, SM-1, SM-2 및 YD-1에서 관찰되고 있다. 이와 같은 감마검층곡선의 유형별 시추공의 분포는 바로 감마분포의 지역별 특성으로 연결된다. 예를 들어 type 1이 관찰되는 HD-3, JD-1,2,3,4, SS-1,2,3,4 그리고 HC-1,2,3, 시추공은 모두가 제주도 동부 저지대에 분포하고 있으며 다른 지역에서 type 1의 감마곡선이 관찰되는 예는 보이지 않는다. 따라서 type 1은 동부 저지대 화산암의 감마분포 특성을 대표하며 이 지역 화산암의 감마분포 특성이 다른 지역과 구분될 수 있음을 보인다. 반면에 type 2의 감마곡선 형태를 보이는 HD-1, HM-1, HM-2, SY-1 시추공의 분포는 북동쪽에서 서북서 해안지역, 즉 북부 저지대에 속하는 지역적

특성을 보인다. 한편 type 3이 관찰되는 WJ-1, WJ-2, YD-2, HD-4,, JD-5, HC-4 시추공은 중앙부에 해당되며 YS-2호공, MR-1, 2호공, SM-1, 2호공은 서쪽과 서남쪽 저지대를 대표한다.

이와 같이 감마검층곡선에서 동일 유형들은 모두 지역적으로 일정한 경계 내에 집중적으로 분포하며 이러한 양상은 각 시추공 위치에서 감마검층곡선의 유형을 도시한 그림 3A에서 잘 나타나고 있다. 즉, type 3의 감마검층곡선 유형이 중앙에 분포하고 그 바깥 해안 저지대를 type 1, type 2, 그리고 type 4가 분포하는 지역으로 구분된다. 이 결과는 시추공 코어시료의 암상 분포 특성에 따라 제주도를 동,서,남,북의 4개 지역으로 구분한 고기원외(2013)의 연구결과 (그림 3B)와 전반적인 경향을 같이하고 있다.

단, 감마분포에서 나타난 중앙지역의 분리는 두 연구결과에서 가장 뚜렷한 차이가 되고 있다. 이러한 차이에 비하여 감마검층에서의 자료 수가 부족하고, 특히 남부구역 전체와 중앙구역 내부에서의 감마검층 자료가 없는 것이 감마검층곡선의 유형에 따른 구분(그림 3A)과 암상에 따른 구분(그림 3B) 결과를 분석하는데 있어서 어려움으로 나타나고 있다. 그러나 지역에 따른 차이가 존재한다는 사실과 그 경계가 대체로 일치된다는 점만 가지고도 두 결과간의 비교는 긍정적이라 할 수 있다. 이러한 관점에서 type 1, 2, 3, 4 감마검층곡선 유형이 분포하는 지역을 각기 동구역, 북구역, 중앙구역 및 서구역으로 명명하였으며, 각 구역별 감마검층곡선의 특징을 요약하면 다음과 같다.

1) 동(E) 구역

12개의 시추공(HD-3, JD-1,2,3,4, SS-1,2,3,4, HC-1, 2, 3)이 분포하는 지역이다. 얻어진 감마검층곡선들은 검층이 수행된 심도에 따라 형태적 차이를 보이지만 서귀포층과 U층을 제외시킴으로써 지역 내에 있는 모든 감마곡선이 비슷한 형태를 보인다. 특히 동일 측선상에 있는 곡선들의 형태는 매우 흡사하게 나타난다. 모든 검층공에서 50API 내외의 상대적으로 높은 감마값을 가진 최상부층이 20~120m의 두께로 분포하고 있으며, 그 하부에서는 심도가 커질수록 감마값이 단계적 감소를 보이면서 10~20API의 낮은 감마값까지 나타난다. 하부 구간에서 감마값이 다시 증가하는 경향을 보여 결과적으로 type 1에 해당되는 감마검층곡선을 형성한다. 감마검층곡선의 하부가 현저한 고감마를 보이는 경우는 대부분 서귀포층 또는 U층의 심부까지 감마검층이 이루어진 경우이며, 이는 JD-1 HC-2, HC-3 SS-1, SS-2, SS-3 검층공에서 잘 관찰된다. 동부 지역에서의 평균적인 감마강도는 약 42API이다.

2) 북(N)구역

YD-1, SY-1, HM-1, HM-2, HD-1 검층공이 위치하는 북부 해안 저지대 지역에 해당된다. 4개 구역 중에서 검층공이 가장 해안에 인접해 있는 지리적 특성을 가진다. 주로 50API 내외의 상대적으로 높은 감마값을 가진 최상부층이 존재하고 대체로 하부로 갈수록 감마값이 감소하는 양상이 동구역과 동일하나 하부의 감마값 감소가 점이적이라는 점에서 차이를 보인다. 즉, 북부지역에서 관찰되는 5개 시추공 모두가 높은 감마값을 가진 최상부층으로부터 하부로 갈수록 감마값이 점이적으로 감소하는 경향을 보이는 type 2의 감마곡선 형태를 보인다. 아울러 이 지역에서의 모든 감마검층이 서귀포층 또는 U층 상부 구간에서 종료되어 약하지만 감마값이 증가하는 경향이 관찰되고 있다. 북부지역에서의 평균 감마값은 39API 수준이다.

3) 중앙(C)구역

WJ-1, WJ-2, YD-2 SY-2, HD-4, JD-5 및, HC-4 검층공이 분포하는 중앙 고지대에 해당한다. 심도에 따른 감마값의 변화가 뚜렷하지 않는 type 3 감마곡선이 나타나고 있다. 서귀포층이나 U층에 해당하는 심부 고감마의 존재가 확인되지 않은 곳이며 지역 내에서 비교적 저지대이면서 심도 285미터까지 감마곡선이 획득된 용담 2호공에서 유일하게 서귀포층과 U층의 미약한 흔적이 관찰될 따름이다. 평균 감마값이 53API 수준으로 감마강도가 가장 높은 구역으로 나타난다.

4) 서(W)구역

서쪽 및 서남쪽 해안 지역에 비교적 가까이 위치하며 대체로 심부로 갈수록 감마값이 증가하는 경향의 type 4 감마곡선이 나타나는 구역이다. 6개의 검층공 중에서 YS-2, MR-1, SM-1, SM-2에서 전형적인 type 4의 감마곡선이 관찰된다. 반면에 YS-1 감마검층곡선은 종료 직전인 65m 심도 이후의 증가경향을 중시하면 type 4로 볼 수 있으며 type 4에 속하지만 type 3에도 가까운 MR-2 감마검층곡선은 MR-2 시추공이 서구역과 중앙구역의 경계에 인접해 있음에 기인한 것으로 보인다. 이 구간에서 상대적으로 깊게 감마검층이 이루어진 시추공은 약 140미터의 심도를 보이는 YS-2, MR-2, SM-1이지만 이들 시추공을 비롯하여 서부지역 내 어떠한 감마검층에서도 서귀포층 또는 U층의 존재는 확인되지 않는다. 이 구역 내에서의 감마값은 평균 37API 수준으로서 4개 구역 중에서 가장 낮은 값을 보인다.

2. 감마단면과 층서단면

동구역에는 4개의 측선형태로 분포하는 17개의 시추공 지질주상도와 화산암의 전암 성분자료, 그리고 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대 값 등을 이용한 시추공간 층서대비 연구(고기원외, 2008) 결과가 보고되어 있으며 아울러 우도에 있는 하나의 시추공을 제외한 16개의 시추공에서 감마검층곡선이

획득되어 있는 곳이다. 이러한 점을 이용하여 감마자료에 의한 층 구분 결과와 기존의 층서대비 연구결과를 비교하였다(Fig. 4 ~Fig. 7)

얻어진 감마단면은 측선에 따라 약간의 차이는 있으나 전반적으로 40~90API 범위의 최상부층으로부터 시작하여 20~45API 범위의 단계적으로 감소하는 저감마층과 30~50API로 약간 증가하는 구간을 거쳐 급격히 증가하는 구간으로 끝나고 있다. 이 결과는 고기원외(2008)에 의하여 구분된 5개의 지질시기별 구분 중에서 제5기 화산활동기(V), 제4기 화산활동기(IV) 및 제3기 화산활동기(III)의 층 구분과 비교적 좋은 일치를 보인다. II층과 I층의 경우에는 제한적인 분포와 측방 연속성의 부재로 감마단면 상에서의 층 구분이 이루어지지 못했다. 반면에 층후 발달이 잘 되어 있는 V층과 IV층의 경우에는 각 층 내부에 1~2개의 추가적인 감마경계가 존재하고 있어 각 층을 더 세분할 수 있는 것으로 나타나며, 이는 수산측선에서 가장 잘 나타난다.

제시된 감마검층곡선은 상당수가 굴착시 생성된 부유물질의 침전이나 시추공 붕괴 등에 기인하여 당초 굴착된 시추심도에 크게 미치지 못하는 짧은 검층심도를 보여 U층의 특성은 물론이고 서귀포층의 특성 파악까지 어려움을 보이는 곳이 다수 존재한다. 그러나 75미터에서 400 미터의 범위를 보이는 감마검층곡선만으로도 서귀포 상부에 분포하는 화산암의 전반적인 감마 특성 파악에는 크게 무리가 없는 것으로 나타나고 있다. 서귀포층의 감마강도는 대체로 50~80API의 범위를 보이며 U층의 경우에는 감마검층곡선에서 존재가 확실한 곳이 SS-1 단 하나이지만 100API 이상의 높은 감마강도를 보여 U층이 서귀포층에 비해 점토질이 우세한 퇴적물로 구성되어 있을 가능성이 엿보인다. 함께 도시된 층서단면(B)은 서귀포층과 U층의 경계 확인이 앓된 감마단면(A)과의 비교를 용이하게 하기 위하여 원 층서단면도(고기원외, 2008)에서 서귀포층과 U층의 경계를 삭제하는 등 일부 수정을 거친 결과이다.

(a) 한동 측선

HD-1 검층공에서는 전형적인 type 2가 보이는 반면에 HD-3 검층공에서는 type I, HD-4 검층공에서는 type 3이 나타나 3개의 검층공이 제시하는 감마곡선의 유형이 모두 달리 나타난다(Fig. 4A). 감마값의 크기에서도 HD-4에서는 대체로 50API 이상의 고감마로 나타나는 반면 HD-3에서는 약 40API의 중감마이고 HD-1에서는 25API 수준의 매우 낮은 감마값으로 크게 차이를 보인다. 이와 같은 양상은 한동측선에서 감마 분포에 의하여 시추공간의 대비가 곤란함을 말해주고 있다.

그러나 50API 이상의 고감마로 나타나는 표층의 존재가 뚜렷하며 특히 검마검층곡선 상에서의 표층과 그 하부층간의 경계가 뚜렷하여 층의 구분이 용이하다. 결정된 층 경계는 층서단면의 제5기 화산활동기 층(이하 V층)의 하부 경계와 매우 잘 일치하고 있다. 반면에 그 하부 화산암 층군에서는 어디에서도 동일한 위상을 보이는 감마경계 지시자가 보이지 않아 층간 구분이 불가능하다. 물론 층서단면(Fig. 4B)이 가리키는 비슷한 심도에 가능성 있는 감마경계가 존재하고 있어 이를 연결함으로써 결과적으로 감마단면과 층서단면간의 일치를 도모할 수는 있는 것으로 나타난다. 화산암과 서귀포층의 경계는 HD-1에서 뚜렷하고, HD-3와 HD-4에서는 검층 종료직전 짧은 구간에서 나타난 감마반응의 변화를 기준으로 결정하였다.

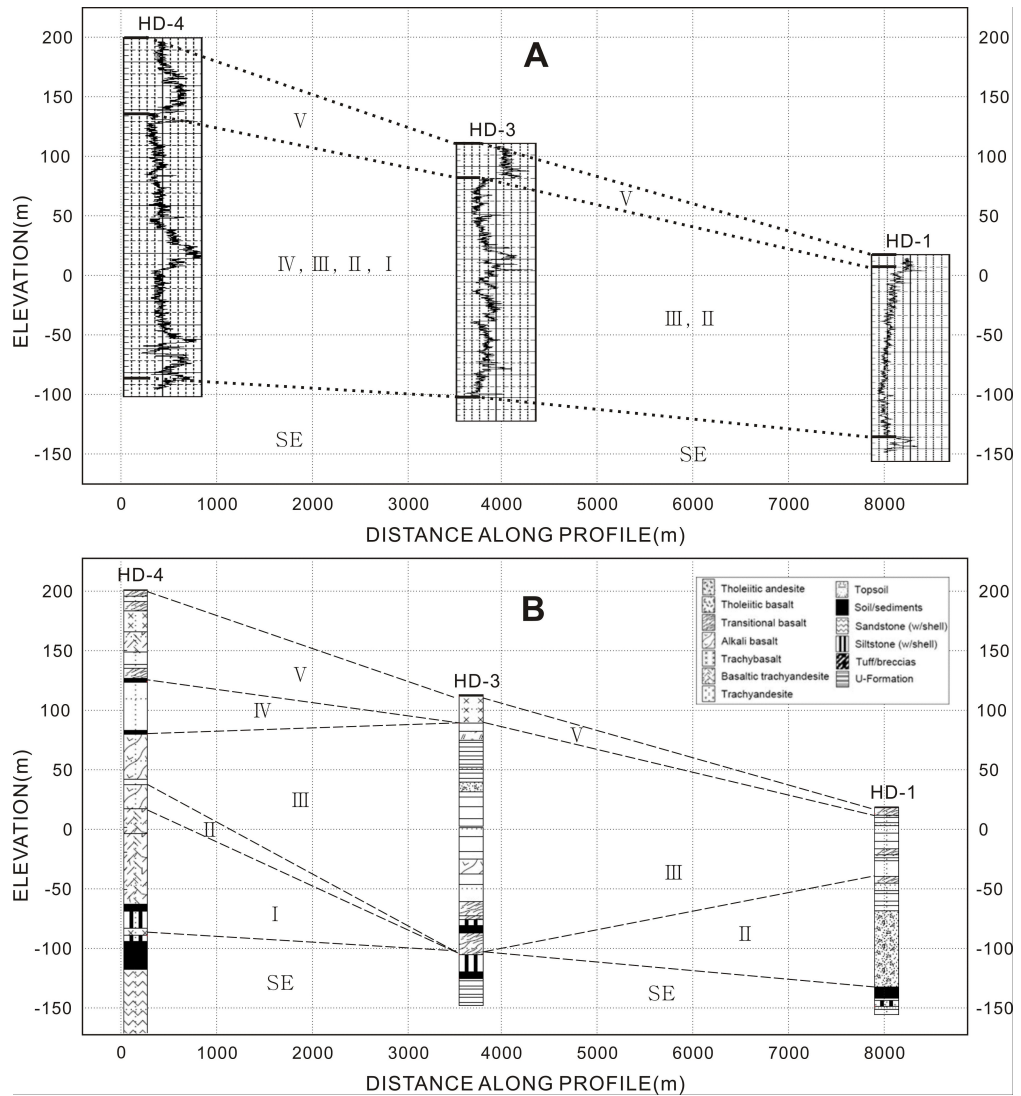


Fig. 4. Comparison between the gamma section (A) and the lithological and chronological section (B) constructed on Handong 4-3-1 boreholes. The lower figure (B) was modified after Koh et al.(2008).

(b) 종달(JD)측선

검층공 JD-1, JD-2, JD-3에서 전형적인 type 1의 감마검층곡선이 나타나는 반면에 JD-5에서는 type 3이 관찰되고 JD-4에서는 type 1이지만 type 3에도 가까운 감마검층곡선이 나타나 유형별 경계가 JD-4 가까이 위치할 것으로 예상되는 측선이다(Fig. 5A). 따라서 동일한 유형을 보이는 JD-1에서 JD-3 사이에서 대비가 용이한 반면 유형의 차이를 보이기 시작하는 JD-4에서 JD-5에 이르러서는 감마분포에 있어서의 측방 연결이 어려움을 보인다.

감마단면이 제시하는 5개의 경계 중에서 첫 번째 경계는 50~70API의 최상부 고감마층과 하부 20~30API의 저감마층이 이루는 경계이다. 감마강도에서의 변화가 현저한 JD-1에서 JD-4 뿐만 아니라 그렇지 못한 JD-5에서까지도 감마분포에 있어서의 측방 연결성이비교적 좋은 편이며, 이는 층서단면(Fig. 5B)에서의 V층과 IV층간의 경계와 거의 일치한다. JD-3, 4, 5에서 두 단면간에 10미터 내외의 심도 차이가 보인다. 감마단면에서의 두 번째 경계는 층서단면의 IV층의 하부 경계에 해당하며, 층서단면 JD-1과 JD-2에서의 결층과는 달리 III층이 JD-3 쪽에서 JD-2와 JD-1까지 연결되고 있다. 이는 JD-3에서 서귀포층 상부에 나타난 검층곡선의 형태가 JD-2을 거쳐 JD-1까지도 그대로 지속되고 있음에 근거한다. 감마단면에서 III층 하부의 화산암에 대해서는 대비할 수 있는 인접한 감마경계 지시자가 없어 층 구분이 이루어지지 못했다. 감마단면에서의 마지막 경계는 화산암과 서귀포층과의 경계에 해당하며 층서 단면과 비교적 좋은 일치를 보인다.

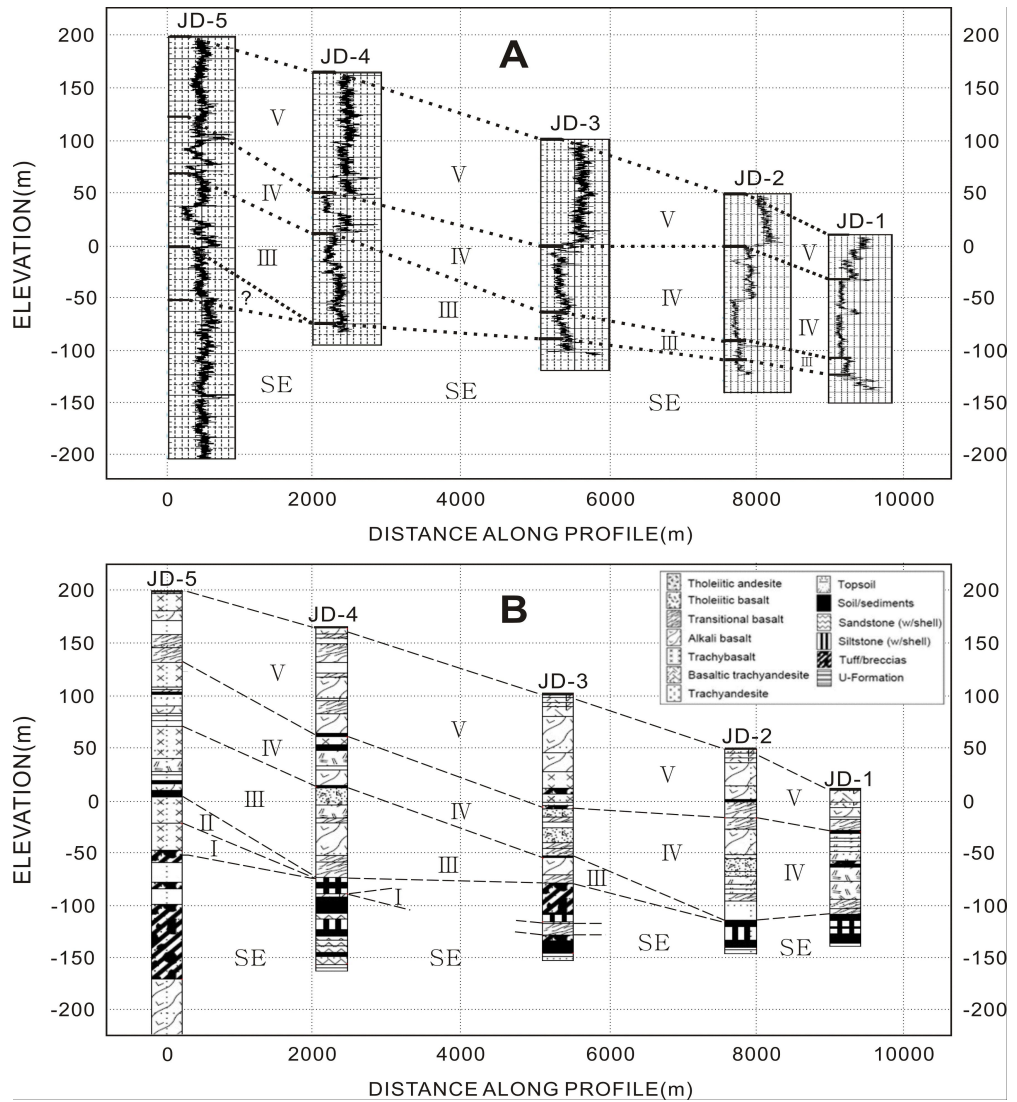


Fig. 5. Comparison between the gamma section (A) and the lithological and chronological section (B) constructed on Jongdal 5-4-3-2-1 boreholes. The lower figure (B) was modified after Koh et al.(2008).

(c) 수산 측선

얻어진 감마점층곡선 4개가 모두 type 1의 형태를 보이면서 대체로 상부로부터 20~70API, 30~60 API, 20~30 AP, 및 40~50 API 범위의 단계적으로 감소하고 증가하는 양상이 형태를 보이면서 시추공간의 연결이 부드럽게 나타나는 측선이다(Fig. 6). 이와 같은 감마 분포특성은 SS-4에서 SS-1 시추공으로 연결되는 자연감마 단면(Fig. 6A)으로 제시되었으며 층서단면(Fig. 6B)과 비교되었다. 최상부에 있는 20~70API의 감마층이 층서단면에서 V층에 일치하며, 그 하부 30~60API와 20~30API 층이 합쳐서 IV층에, 40~50API 감마층이 III층에 대비되고 있다. 내륙 쪽에 위치한 SS-4에서는 감마단면 처리결과가 층서해석 결과와 차이를 보이며 나머지 3개 시추공에서의 감마경계와 층서경계는 비교적 좋은 일치를 보인다.

층서단면 V층과 IV층에 해당되는 감마단면 내에서는 각기 2개의 추가적인 감마경계선이 얻어져 결과적으로 Fig. 6A에는 7개의 감마경계가 도示되어 있다. 모든 감마경계선의 형태는 분출된 마그마의 흐름이 SS-4쪽에서 SS-1 쪽으로 흘러내려간 모습을 연상시키며 매우 일관되게 나타난다. 그러나 SS-4에서의 IV층 상하부 경계(Fig. 6A)는 층서단면(Fig. 6B)과 차이가 크게 나고 있다. 만약 층서단면에서의 경계 부근에 위치하는 감마이벤트를 중시하여 연결시킨다면 Fig. 6B에서와 같이 층서단면과의 일치를 도모할 수 있다. 그러나 감마단면 측면에서 보면 기존의 층서단면과는 차이가 있지만 Fig. 6A에서의 일관성과 합리성이 더 커 보인다. 더욱이 SS-3과 SS-4에서의 IV층 상하부 경계는 층서단면 상에서도 고려의 여지가 있는 것으로 나타나고 있어 감마단면에서의 가능성을 엿볼 수 있다. 마지막 7번째 감마경계는 층서단면의 III층과 서귀포층의 경계와 잘 일치하고 있다. 한편 SS-1에서의 감마점층곡선 최하부에서는 100API 이상의 고감마가 인지되고 있으며 이는 이 지역에서 유일하게 U층의 존재를 반영하는 것으로 보여진다.

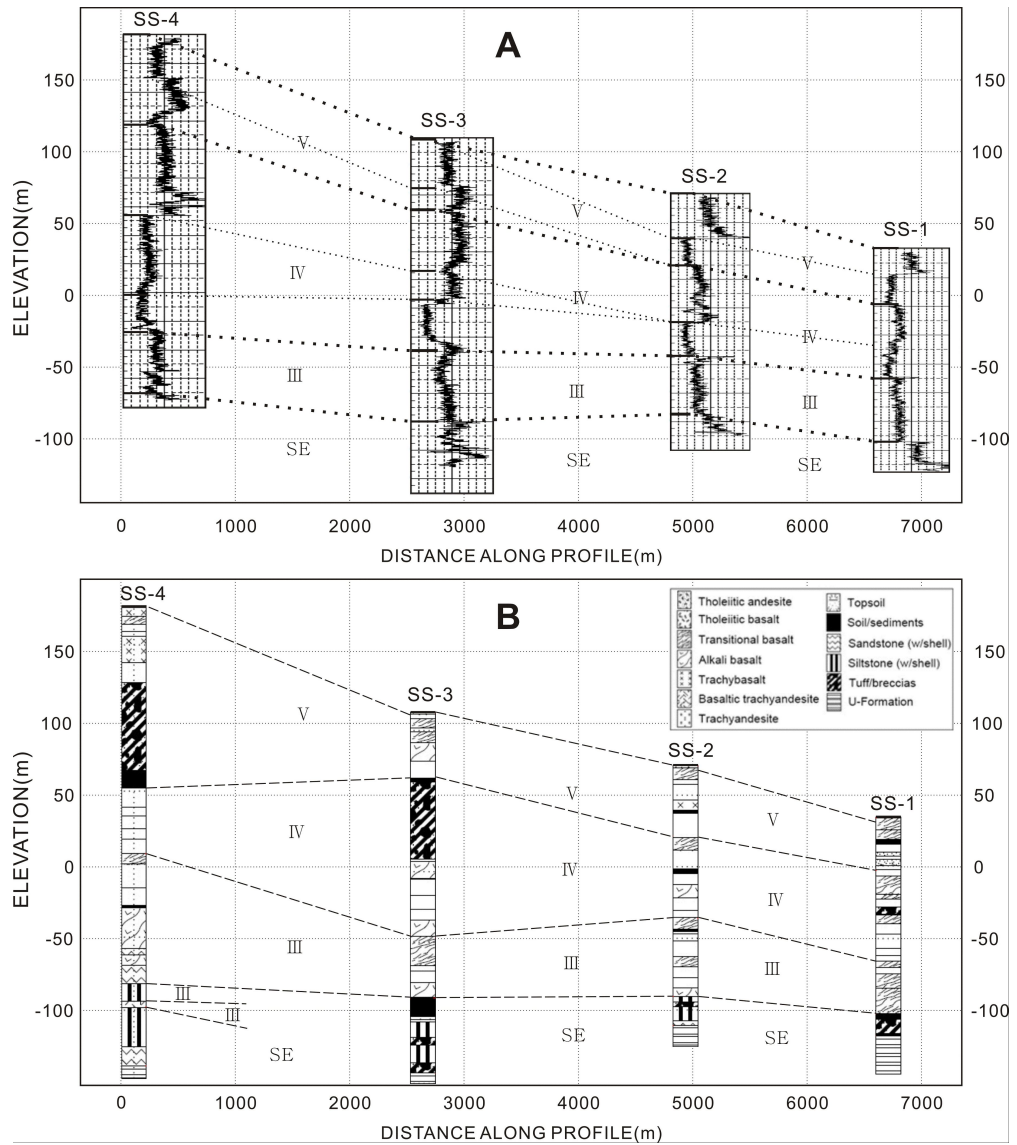


Fig. 6. Comparison between the gamma section (A) and the lithological and chronological section (B) constructed on Susan 4-3-2-1 boreholes. The lower figure (B) was modified after Koh et al.(2008).

(d) 하천 측선

HC-1, HC-2, HC-3로 연결되는 3개 검층공에서 type 1의 감마검층 곡선을 보이는 반면에, HC-4에서는 심도에 따른 감마값의 변화가 복잡하지만 대체로 type 3에 해당하는 감마검층곡선이 나타나는 측선이다. Fig. 7은 하천측선에서 작성된 감마단면(Fig. 7A)을 층서단면(Fig. 7B)과 비교한 것으로 두 단면간에는 높은 일치도를 보이고 있다.

4개의 감마곡선 모두에서 뚜렷하게 나타나는 50API 내외의 최상부 고감마 존재가 V층에 해당된다. 그 하부에는 단계적으로 감마값이 감소하는 두 번째층이 IV층으로 나타난다. HC-4에서의 3번째 층(III) 구분은 가능성 높은 감마경계 지시자라기 보다는 층서경계 부근에 존재하는 유일한 감마이벤트를 이용하여 이루어진 결과이다. 반면에 층서단면에서는 IV층에 포함되어 있지만 HC-1과 HC-2 하부에서 다시 감마값이 증가하는 구간에 설정한 세 번째 감마층은 III층의 가능성이 높아 보인다. 종달 측선의 JD-1과 JD-2에서 III층 경계가 설정된 것과 동일하게 보이는 감마 환경이다. 서귀포층의 상부경계는 미약하지만 50API 이상의 감마강도를 보이기 시작하는 부분으로 나타난다. 단 HC-2에서는 오히려 검층 종료 직전에 나타난 불규칙적인 분포의 저감마 부분으로 잡았으며 이는 서귀포층의 전반적인 고감마 성향에도 불구하고 입도분포의 차이에다 시추작업에 수반된 층경계 부근에서의 시추공 확장(washout)이 영향을 미치고 있음을 나타낸다,

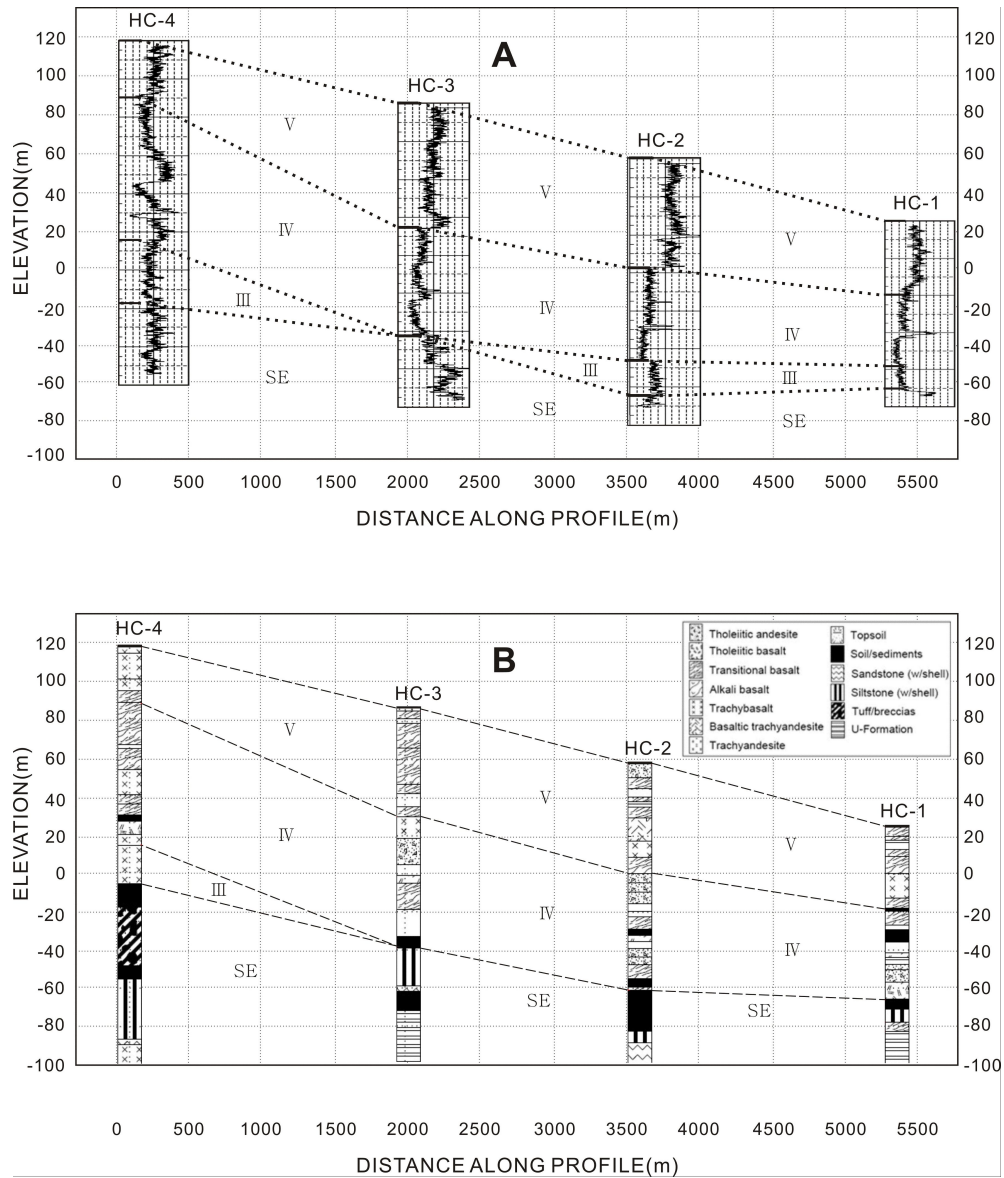


Fig. 7. Comparison between the gamma section (A) and the lithological and chronological section (B) constructed on Hacheon 4-3-2-1 boreholes. The lower figure (B) was modified after Koh et al.(2008).

3. 시추공별 평균 감마강도 분포

Fig. 8은 제주도에서 얻어진 전체 29개 검층공에서의 감마검층곡선으로부터 구한 화산암 구간의 평균 감마강도를 등고선도(contour map)의 형태로 제시한 결과이다. Fig. 8A는 각 검층공에서의 화산암 전구간에 대한 평균 감마강도이다. 60API 이상을 보이는 고감마의 중심이 YD-2에 위치하고 있으며, 해안쪽으로 가면서 감마강도가 감소하다 30API 이하의 저감마가 서남서 쪽 SM-1, SM2 시추공과 동북동 쪽인 JD-1에서 나타나고 있다. 감마검층 자료가 없는 남부지역 내에서의 감마강도선 연결 여부가 분명하지 않은 문제점은 있지만 개략적으로 동심원적 감마분포에 중앙 내륙지역에서의 고감마와 해안지역 쪽으로의 저감마 현상을 비교적 뚜렷하게 인지할 수 있다.

한편 제주도 화산암의 감마분포 특징 중의 하나는 표층을 형성하는 제5기 화산활동기층이 고감마를 보이면서 그 하부에 있는 저감마 화산암과 크게 대조를 이루는 현상이다. 이는 거의 전체 감마검층곡선에서 일관되게 나타나는 현상으로 감마검층으로부터 V층의 하부 경계가 쉽게 인지되고 있다. Fig. 8B와 C는 이러한 점을 이용하여 감마검층곡선으로부터 29개 시추공의 화산암 구간을 V층과 IV이하 층으로 구분하고 각 층에서 구한 시추공별 평균 감마강도를 도시한 것이다.

V층에서의 평균 감마강도 등고선도(Fig. 8B) 또한 화산암 전체구간 평균(Fig. 8A)에서와 비슷한 모습을 보이나 전반적인 감마강도의 증가로 60API 이상을 보이는 고감마의 영역이 크게 확장되었고 감마강도선의 동심원적 형태가 강화된 모습을 보인다. 중앙 내륙지역에서의 고감마가 해안지역 쪽으로의 저감마로 바뀌는 현상과 함께 개략적으로 제주도의 동서 확장축을 따라 연장된 감마강도 분포의 형태도 보인다. 함께 도시된 시추공별 V층의 주 구성 암종의 분포에서는 60API 이상의 고감마 지역에 M이 나타나는 반면에, 40API 이하의 저감마 지역에 A가 주로 분포하고 그 사이 중간 감마강도 지역에 W, TR, D, SC가 분포하고 있음을 보인다. 감마강도가 화산암의 암상과 비교적 높은 상관관계를 가지고 있으며, 암

중 분포가 감마값의 변화에 직접 영향을 미치고 있음을 가리키고 있다. 반면에 저감마를 대표하는 A가 고감마를 대표하는 한 지질 요소로까지 나타난 것은 높은 점유비와 함께 V층에서의 현저한 감마강도 증가 현상을 반영하고 있다.

V층 하부 화산암 구간의 평균 감마강도 값을 도시한 결과(Fig. 8C)에서는 고감마의 중심이 50API로서 V층에서의 60API 등고선보다도 축소되었으며, 반면에 30API 이하의 저감마 존재가 SM-1, YS-2, HM-1, HD-1, JD-1, JD-2, SS-2, HC-1, HC-2 등 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있음이 차이로 나타난다. V층의 경우에 비하여 현저히 감소된 평균 감마강도 값 외에도 등감마강도선의 동심원적 형태가 약화되어 동서 확장축을 기준으로 가운데 부분의 감마강도가 높고 동서 양단으로 갈수록 낮아지는 경향이 나타난다. 이와 같은 경향은 동부와 서부지역의 용암류가 남부와 북부에 비해 비교적 분화된 조면안산암과 조면암이 분포되지 않고 전이질 현무암과 비알칼리암류를 더 많이 포함하고 있다는 보고(고기원 외, 2013)와도 부합하는 것으로 보인다.

V. 제주도 화산암의 감마강도 특성

1. 암종별 감마강도

표 1은 제주도 전체지역을 대상으로 화산암 전구간에 대하여 광물조성에 근거하여 분류된 암종별 감마강도를 구한 결과이다. 감마검층보고서(한국지질자원연구소, 2004)의 코어로깅에서 제시되어 있는 6개 암종인 A, W, D, M, TF, TR에 대한 평균감마값이 제시되었다. 33.4 API의 A가 가장 낮은 평균 감마값으로 나타나고, 그 위에 42~49API 값을 보이는 W, D가 분포하며 M, SC, TF, TR이 50API 이상의 고감마 지질로 나타난다. 그 중에서도 평균감마 값이 가장 높은 암상은 TR로 나타난다. 이와 같은 결과는 광물조성에 근거하여 분류된 암종과 감마강도 간에 비교적 좋은 상관성이 있음을 보여주고 있다. 점유비 측면에서 보면 가장 낮은 감마강도를 보이는 A가 전체 화산암의 35.5%로 압도적인 분포를 보이고 W(20.1%), M(18.8%), TR(10.8%) 순으로 감소하고 있다. 6%대의 점유비를 가진 D와 9% 미만의 점유비를 보이는 TF가 주요 암종 중에서 가장 제한적으로 분포하는 것으로 나타난다.

Table 1 Averaged gamma strength grouped by lithology for the whole Jeju volcanic rocks.

Classification	A	W	D	M	TF	TR	Total
gamma strength(API)	33.4	42.6	48.5	50.4	54.8	58.3	44
proportion(%)	35.5	20.1	6.4	18.3	8.9	10.8	100

2. 구역별 감마 강도

표 2는 감마곡선의 유형에 따라 구분된 4개 구역에서의 화산암의 전체 및 암상별 평균 감마강도를 구한 결과이다. 가장 큰 특징은 중앙(C)구역에서의 현저하게 높은 감마강도의 존재이다. 즉 중앙구역의 전체 평균감

마 강도가 약 53API로서 주변에 분포하는 동, 서, 북 구역에서의 40API 내외의 감마강도에 비하면 30% 정도 높은 값이다. Fig. 8과 9에서 나타난 해안저지대 쪽으로 이동할수록 감마 강도가 낮아지는 현상이 반영된 결과이다. 중앙구역을 제외한 나머지 3개 구역이 모두 낮은 평균 감마강도를 보이나 그 중에서도 서구역이 가장 낮고 북구역, 동구역의 순으로 평균 감마강도가 증가하는 경향을 보인다.

이러한 경향은 각 구역을 구성하는 암상분포와도 비교적 좋은 상관을 보인다. 즉, 북구역과 서구역에서는 표1에서 고감마로 나타난 TR, TF, M의 구성비가 미미한 반면에 동구역에서는 이들 암종의 구성비가 상대적으로 높아지며 가장 높은 감마강도의 중앙구역에는 가장 높은 감마강도의 TR의 점유비가 크게 나타난다. 즉 구역별로 감마값의 차이가 존재하며 이 차이는 구성 암종 차이와도 상당히 밀접한 연관을 가진 것으로 볼 수 있다.

Table 2. Averaged gamma strength (unit in API) grouped by four regions. Number in parenthesis represents the lithological proportion (unit in percent); ; (A) acicula basalt (W) Wangime trachyte (D) Deapodong type trachybasalt (M) Muljangol trachybasalt (TF) tuff and scoria (TR) trachyte.

Classification	Zone E	Zone N	Zone W	Zone C
Total	42.8 (44.7)	39.0(10.6)	37.4(9.1)	52.8(35.6)
A	33.6(14.6)	34.8(8.9)	33.1(7.8)	47.5(3.9)
W	41.1(13.5)	58.0(0.6)	-	50.3(6.8)
D	-	-	-	50.7(6.5)
M	52.5(11.5)	541.(0.6)	-	52.9(8.8)
TF	50.3(4.3)	-	65.0(1.0)	57.5(1.5)
TR	61.2(0.8)	75.0(0.5)	55.0(0.3)	58.3(8.1)

3. 분출시기별 감마강도

분출시기에 따른 감마강도의 특성차이는 축선별 시기단면도가 제시되어

있는 동구역을 분석 대상으로 하여 이루어졌다. 측선별 시기 단면도(고기원 외, 2008)를 이용하여 550Ka~400Ka(I층), 400~300Ka(II층), 300Ka~200Ka(III층), 200~100 Ka(IV층), 100Ka 미만(V층)의 5개 시기에 해당하는 화산암의 평균 감마강도가 구해졌다. V층이 51.6API의 고감마로 나타나고 IV층과 III층이 37.7 API와 32.5 API로 감마강도의 감소현상이 현저하다(표 4). II층, I층의 경우는 분포가 극히 제한되어 있어 표 작성에서는 제외하였으며 감마 강도는 각각 20API와 54API 수준이다. V층의 감마강도 값을 기준으로 할 때 대체로 IV층과 III층에서 27%와 37%의 감마강도 감소로 나타난다. 굳이 II, I층까지 포함시킨다면 61%의 감소를 보이는 II층에 이어 거의 100% 수준의 I층이라고 할 수 있다. 이와 같은 시기별 감마강도의 분포양상은 동구역을 대표하는 type 1 감마검층곡선의 특성을 반영하고 있다.

한편 표 3에서는 암종별 감마강도가 분출시기별과 함께 제시되어 있다. 평균 감마강도에 따라 저감마의 A, 중감마의 W, 그리고 고감마의 M, TF, TR 군으로 나누어서 볼 때 V층에서는 저, 중, 고 감마군이 균등 분포하는 반면에 IV층과 III층에서는 고감마군에 속하는 암종의 점유비가 낮은 특징을 보인다. 반면에 IV층에서는 중감마의 W분포가, III층에서는 저감마의 A분포가 압도적임을 보여주고 있다. 주가 되는 암종의 차이가 시대별 감마강도 차이에 영향을 미치고 있음을 보이는 부분이다. 뿐만 아니라 동일한 암종이 V층에서 고감마로 나타나고 IV, III 층에서는 저감마로 나타나 지질시기가 암석의 감마강도에 영향을 미치는 경향도 보인다. TF가 이러한 경향에서 벗어나 있으나 이는 단 한 구간에서의 극히 제한된 분포에서 나타난 예외적인 현상으로 A를 비롯하여 나머지 모든 암종에서 인지되는 공통되는 현상이다.

Table 3. Averaged gamma strength (unit in API) grouped by geological time in eastern(E) region. Number in parenthesis represents the lithological proportion (unit in percent); ; (A) acicula basalt (W) Wangime trachyte (D) Deapodong type trachybasalt (M) Muljangol trachybasalt (TF) tuff and scoria (TR) trachyte.

Classification	V	IV	III
A	40.5 (16.2)	16.2 (2.2)	29.5 (26.0)
W	48.0 (11.6)	32.0 (17.5)	-
M	60.4 (11.9)	19.0 (1.0)	37.1 (9.9)
TF	30.0 (0.6)	53.2 (9.6)	48.8 (2.1)
TR	61.7 (1.7)	-	-
Total	51.6 (37.7)	37.7 (30.3)	32.5 (38.0)

표 4는 분석대상을 제주도 전 지역으로 확대하여 시기에 따른 감마강도의 차이를 비교한 것이다. 시기별 차이를 보기위하여 V층과 IV 이하층의 두 그룹으로 구분하여 비교하였다. IV층 하부에서의 층 구분이 불확실한 서구역 북구역 등 모든 구역을 함께 포함시켜 다루기 위하여 제주도 전 지역을 통하여 비교적 현저한 표층 고감마의 존재를 V층으로 잡고 V층 하부 경계를 기준으로 구분한 것이다. 암종 구분은 광역 자료에 해당하는 광물조성별 분류기준을 사용하였다. V층이 VI~I층에 비해 평균 감마강도가 약 10API 커서 VI~I층에 대한 감마강도비가 1.25로 나타난다. 구역별 특성에서 나타난 현상과 마찬가지로 고감마 V층에서는 고감마 암종의 점유비가 높고 저감마 IV~I 층에서는 저감마 암종의 점유비가 높게 나타난다. 아울러 동일 암종간의 감마강도 비교에서도 점유비 1% 미만의 TF 한 암종을 제외한 모든 암종에서 V층의 감마강도가 12~40% 높게 나타난다.

Table 4. Averaged gamma strength of volcanic rocks grouped by geological time and lithology in Jeju Island; (A) acicula basalt (W)Wangime trachyte (D) Deapodong type trachybasalt (M) Muljangol trachybasalt (TF) tuff and scoria (TR) trachyte.

Classification		A	W	D	M	TF	TR	Total
V	API	41.9	49.4	56.6	56.8	30	63.6	50.6
	%	10.5	8.3	2.3	9.9	0.3	2.4	33.7
IV	API	30.0	37.7	43.7	42.8	55.6	56.7	40.4
	%	26.1	11.5	3.9	8.1	8.5	8,2	66.3

표 5는 구역에 따른 시기별 평균 감마강도를 비교한 것으로 동구역과 북구역에서는 시기별 차이가 큰 반면에 서구역과 중앙구역에서는 시기별 차이가 거의 없는 것으로 나타난다. 동구역과 북구역이 심도에 따라 감마강도가 감소하는 경향이 우세한 type 1과 type 2 감마검층곡선의 분포지라는 사실이 감마강도에서의 시기별 차이로 나타나고 있다. 중앙구역과 서구역에의 작은 시기별 감마강도 차이 또한 type 3과 type 4 감마검층곡선으로부터 예상되는 결과의 하나이다.

Table 5. Averaged gamma strength of volcanic rocks grouped by geological time and region. (unit in API)

Classification	E region	N region	W region	C region	total
V (<100 Ka)	51.2	44.3	38.1	54.1	50.6
IV~I(100~550 Ka)	40.0	37.7	37.1	52.4	43.8

VI. 토 의

29개 검층공에서 얻어진 제주도 화산암의 감마강도의 분포는 대체로 20~90API 범위로 나타났다. 제주도 전 지역에 걸쳐 자료가 확보되어 있는 광물조성 및 암상에 기초한 암종별 감마강도 분포는 A가 33.4API로 가장 낮은 감마 강도를 보이고, W, D가 42.6API와 48.5API의 중규모 감마강도를 보이며, M, TF(TR)이 50API 이상의 고감마 지질로 나타났다. 그 중에서도 감마강도가 가장 높은 암상은 TR이며 58.3API의 평균값을 보인다.

감마분포의 심도에 따른 변화는 다양하게 나타났지만 서귀포층 상부에 있는 화산암만을 대상으로 삼고 심도에 따른 감마 강도의 변화양상을 최대한 단순화시킴으로써 모든 감마곡선을 4개의 유형으로 구분할 수 있었다. 심도가 증가함에 따라 감마값이 단계적으로 감소하다 심부에서 증가 경향을 보이는 유형, 심도 증가에 따라 감마값이 점이적으로 감소하는 유형, 심도에 따른 특기할 만한 증감의 경향이 없는 유형, 그리고 심도에 따라 감마값이 증가하는 유형으로 구분하였으며 각각 type 1, type 2, type 3, 그리고 type 4로 명명하였다. 지역적인 분포는 중앙구역에 type 3이 위치하고, 그 바깥 해안 저지대를 나누어 동구역에 type 1, 북구역에 type 2, 서구역에 type 4가 분포하는 양상으로 나타난다. 비록 남구역에서의 감마검층 자료가 없어 완전한 비교가 이루어지지는 못했지만 동구역, 북구역, 서구역에서의 감마곡선의 유형에 의한 구분은 지질 특성에 의한 구분(고기원, 2008)과도 비교적 잘 일치하고 있다.

감마분포에 의한 구분 결과가 기존의 암상에 의한 구분과 다르게 나타난 대표적인 경우는 중앙구역의 존재이다. 물론 중앙구역을 분리시키게 한 type 3이 다른 3개 유형의 중간성격을 가졌다는 점이나 중앙구역 중심 부근에서의 자료가 없이 확정된 존재라는 점에서 중앙구역을 없애서 암상에 의한 구분결과와의 일치를 도모할 가능성도 있어 보인다. 그러나

type 3의 존재는 감마분포에서 뚜렷하게 인지되는 현상이며 제주도의 형성과정에서 가장 중요한 역할을 한 대부분의 화산분출구를 포함하는 중앙고지대를 주변지역과 구분하는 것은 그 자체로 의미를 지니는 것으로 보인다. 따라서 이 결과는 최소한 제주도의 화산암을 동, 서, 남, 북의 4지역으로 구분하고 지역에 따른 화산활동의 차이가 있음을 지지하는 지구물리학적 자료의 하나이며 아울러 향후 제주도 중앙지역의 지질학적 특성 규명에 도움이 될 수도 있을 것으로 보인다.

감마분포의 형태를 제주도 전체 규모로 살펴보면 중앙 고지대에서 상대적으로 높은 감마강도를 보이며 해안 저지대 쪽으로 갈수록 감마값이 점차 감소하는 경향이 뚜렷하다. 해안쪽으로 갈수록 감마강도가 약해지는 현상은 화산암 전 구간에 걸쳐 나타나며 특히 표층을 형성하고 있는 제5기 화산분출기 층에서 뚜렷하다. 대체로 해안선에 평행한 모습을 보이는 등감마선의 분포형태는 분출된 마그마의 중앙지역으로부터 해안쪽으로의 유동과 제주도의 동서 확장축의 존재를 연상하게 한다. 중앙구역 내부, 특히 한라산 주변부에서의 감마검층자료가 없다는 약점에도 불구하고 모든 표층 감마분포 양상들은 제5기 화산활동이 중앙구역에서의 분출과 해안 방향으로의 일관된 확장으로 설명될 수 있을 것으로 보인다.

대체로 제주도의 중앙을 중심으로 동심원 형태를 보이며 주변 저지대 해안 쪽으로 갈수록 감마강도가 낮아지는 감마분포 현상을 설명할 이론적 근거는 확실하지 않지만 일단 심성암에 비해 분출암의 감마강도가 낮게 나타나는 일반적인 현상과 연결될 수 있을 것으로 보인다. 동일기원의 마그마라도 정치되는 심도에 따라 감마강도가 달라짐과 함께 감마강도가 분출된 마그마의 이동 거리에 크게 영향을 받고 있음도 나타난다. 각 시기별 화산암을 형성시킨 마그마의 기원이 다른 경우는 물론이고 기원이 동일하다(Park and Kwon, 1996) 하더라도 정출환경의 차이가 감마반응의 차이로 나타나고 있음을 보인다.

반면에 중앙구역, 동 북, 서 구역 등 지역에 따라 달리 나타나는 감마검층곡선의 형태는 제5기 화산분출기 이전의 경우 화산활동이 구역에 따

라 다르게 진행되었을 가능성을 제시하고 있다. 4개 유형의 감마점층곡선의 분포와 화산암의 평균 감마값 분포는 중앙구역의 분리위에 동, 서, 남, 북의 4개 구역으로의 구분을 지지하고 있다. 그러나 감마구분에서 중앙구역의 존재를 제외한다면 암상분포에 의한 4개 지역으로의 구분과 거의 비슷한 결과가 될 것이다. 아울러 저감마의 서지역 및 동 지역과 고감마의 남 지역 및 북 지역으로 표현될 수도 있다. 이는 IV~I층의 등감마선도에서 서남서-동북동 방향의 장축을 기준으로 양단에 30API 미만의 가장 낮은 감마가 분포하며 중앙으로 갈수록 고감마 경향을 보이고 있음에서도 잘 나타난다. 이 양상은 동부와 서부지역의 용암류가 남부와 북부에 비해 비교적 분화된 조면안산암과 조면암이 분포되지 않고 전이질 현무암과 비알칼리암류를 더 많이 포함하고 있다는 보고(고기원 외, 2013)와 부합될 수 있을 것으로 보인다.

층선별 시기단면도가 제시되어 있는 동구역에서는 500Ka~400Ka(I층), 400~300Ka(II층), 300Ka~200Ka(III층), 200~100 Ka(IV층), 100Ka 미만(V층)의 5개로 구분되어 구해진 각 시기별 화산암의 평균 감마강도는 51.6API, 37.7API, 32.5API, 20API 및 54API로서 시기에 따라 화산암의 감마강도 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 시기별 감마강도 차이는 무엇보다도 V층과 같은 고감마층에서는 저, 중, 고 감마군이 균등 분포하는 경향을 보이는 반면에 IV층과 III층과 같은 저감마층에서는 고감마군에 속하는 암종의 점유비가 매우 낮은 등 암종분포의 차이에 영향을 받고 있음을 보인다. 또 한편으로는 동일 암종이라도 V층에서 고감마로 나타나는 반면에 IV, III 층에서는 저감마로 나타나면서 지질시기에 따른 화산암의 감마강도 차이를 증폭시킨 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 지질시기별 화산암의 감마강도 차이와 연관하여 층서단면과 감마단면 간에 나타난 비교적 좋은 일치는 감마점층을 이용한 시추공간의 대비가 매우 효과적인 연구수단(Rider, 1996)임을 제시하였다. 감마단면과 층서단면의 비교에서 일부 상치되는 부분에 대한 해석의 결정권은 당연히 층서단면에 있다. 다른 지구물리자료와 마찬가지로 감마자료 또한 해석에서의 비유일

성(Lillie, 1999)이란 한계를 벗어날 수 없기 때문이다. 그러나 연대 측정 자료의 부정확이나 오차한계 등 층서단면에서 가변성이 존재할 때는 오히려 감마단면이 층서단면의 검토나 수정에 매우 효과적인 기준이 될 수 있을 것이다. 특히 감마단면과 층서단면 사이에 심도차가 존재할 때는 감마단면이 보다 확실한 기준이 될 수가 있다. 이는 시추 주상도에서의 심도가 시추기술자의 숙련도 또는 시추코어의 상태에 따라 상당한 차이를 보일 수 있고 시추 장비에서의 수 cm 길이 오차만으로도 심도 수백미터의 시추공에서는 수미터에서 수십미터의 오차로 연결될 수 있음에 비해 표준화되어 있는 심도측정 장치에 원위치 암반에 대한 측정이라는 특성을 가진 검층에서의 심도가 훨씬 정확하고 안정적(김영화외, 1998)이기 때문이다

한편 지역에 따라 크게 달리 나타난 감마분포 특성은 대상 지질에 대한 감마반응이 비유일반응(non unique response)의 한계를 벗어나지는 못하는 한계와 결부되어 동구역에서 얻어진 감마곡선에 의한 지질시대별 층구분 결과를 제주도 전체로 확대 적용하는데 있어서의 어려움으로 나타난다. 그러나 향후 각 구역 내에서 최소한의 지질시대 구분자료와 연계된다면 각 구역 내에서의 층 구분에서 감마검층곡선이 보다 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

VII. 결 론

제주도 화산암의 감마강도 분포상태와 주요 암종별, 구역별, 분출시기별 특성과 연관된 감마특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

제주도 화산암은 암종별로 감마강도 차이가 비교적 뚜렷하여 감마강도와 암종간의 상관성 추적은 물론 제주도 지역에서의 지질조사에서 감마자료의 적용이 효과적일 수 있음을 보여준다.

감마곡선을 4개의 유형으로 구분하여 지역적으로 분류한 결과 동일 유형의 형태는 일정한 지역경계 안에 분포하고 있어 감마분포의 특성이 화산암의 지역적 특성과 결부될 수 있음을 알 수 있다.

감마값의 분포가 중앙 고지대에서 해안 저지대 쪽으로 갈수록 동심원적인 분포를 보이면서 점차 감소하는 경향은 분출된 마그마가 중앙지역으로부터 해안 쪽으로의 유동과 제주도의 동서 확장축의 존재를 보여준다.

층서구분이 되어있는 동구역에서 지질시기별 화산암의 감마강도 차이와 연관하여 층서단면과 감마단면 간에는 비교적 좋은 일치를 보여주고 있으며, 이는 감마검층을 이용한 시추공간의 대비가 매우 효과적임을 보여준다.

화산암의 지질시대별 감마강도의 특성차이는 각 층에서의 암종의 차이와 함께 분출시기별 마그마의 감마특성 차이가 함께 만든 결과로 보인다.

감마단면과 층서단면 사이에 심도차가 발생할 때는 감마단면이 보다 확실한 기준이 될 수 있는 것은 오차가 발생할 수 있는 코어검층에 비해 표준화되어 있는 심도측정 장치와 원위치 암반에 대한 측정이라는 특성 때문이다.

층서단면과 같은 지질시대자료와 연계한다면 감마검층곡선은 향후 제주 지역 각 구역내의 지층 구분에 보다 효과적으로 활용 될 수 있음을 알 수 있다.

References

- 고기원, 1997, 제주도의 지하수부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 박사학위논문, 325.
- 고기원, 2004, 제주도 동부지역의 지하 지질분포와 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대, 대한지질학회 춘계학술답사 제주도의 화산암과 화산활동 자료집, pp.29~50
- 고기원, 박준범, 박윤석, 2008, 제주도의 지질과 화산활동에 관한 연구 (I): 동부지역 저지대 시추코어 화산암류의 암석화학 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 절대연대, 자원환경지질, 41, 93-113.
- 고기원, 박준범, 강봉래, 김기표, 문덕철, 2013, 제주도의 화산활동, 지질학회지, 49, 209-230.
- 김영화, 장승익, 김중열, 현혜자, 1998, 풍암퇴적분지 내 시추공 PABH1에서 불연속면에 대한 물리검층방법의 적용, 대한지질공학회지, 8-3, 261~273
- 김태원, 2014, 한반도의 자연감마 분포 특성에 관한 연구, 강원대학교, 이학석사학위논문, p66
- 이동영, 임정웅, 염병우, 1994, 자연감마선검층에 의한 암층구분 및 지질구조해석, 대한지질학회지, 30, 467-474.
- 이문원, 1994, 제주도의 형성사와 지질구조, 제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발이용 심포지움 발표 자료집, 54~74.

한국지질자원연구소, 2004, 미래 제주도 청정지하수 안정적 공급 시스템
구축 사업 보고서, 209.2

Dickson, B.L., and Scott, K.M., 1997, Interpretation of aerial gamma
ray suveys - adding the geochemical factors, AGSO Journal of
Australian Geology and Geophysics, 17(2), 187-200.

Grasty, R.L., 1975. Uranium measurement by airborne gamma-ray
spectrometry. Geophysics, 40, 503-519.

Keys, W. S, 1989, Borehole Geophysics Applied to Ground-Water
Investigations. ; National Water Well Association, p.103- 128.

Lillie, R.J., 1999, Whole Earth Geophysics, 1999, 426.

Marett, G., Chevalier, P., Souhaite, P. and Suau, J., 1976. Shaly
sand evaluation using gamma ray spectrometry, applied to the
North Sea Jurassic. SPWLA 17th Ann. Logging Symp., 1-20.

Mathis, G.L., Rutledge, D.R., and Ferguson, W.E., 1984. A spectral
gamma ray (SGR) tool. SPWLA 25th Ann. Logging Symp., 1-21.

McCafferty, A.E. Van Gosen, B.S., 2009, Airborne gamma-ray and
magnetic anomaly signatures of serpentinite in relation to soil
geochemistry, northern California. Applied Geochemistry,
Volume 24, 1524-1537.

- Mussett, A.E., Khan, M.A., 2000, Looking into the Earty, Cambridge University Press, 470.
- Park, J. B and Kwon, S. T., 1996, Tholeiite volcanism in Cheju Island, Korea, Journal of Petrological Society of Korea, 2, 139-155. (in Korean with English Abstract)
- Rider, M.H. 1996. The Geological Interpretation of Well Logs, Whittles Publishing, Caithness, 280.
- Serra, O., 1984, Fundamentals of well-log interpretation, Elsevier Science publishing Co. Inc., 423.
- Serra, O., Baldwin, J. and Quirein, J., 1980. Theory, interpretation and practical applications of natural gamma ray spectroscopy. Trans. SPWLA 21st Annu. Logging Symp., 27:Q1-Q30.
- Valgardur Stefansson, Steinar Thor Gudlaugsson, and Asgrimur Gudmundsson, 2000, Silica content and gamma ray logs in volcanic rocks, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28, p. 2893-2897.
- Zeller, E.J., Dreschhoff, G.A., and Thoste, V., 1990, Uranium resource evaluation in Antarctica, in Splettstoesser, J.F., ed., Mineral resources potential of Antarctica: Antarctic Research Series, 51, 95-116.

AN ANALYTIC STUDY ON THE GAMMA LOG DATA OBTAINED FROM JEJU VOLCANIC ROCKS

Shim Gyu Seong

*Department of Geophysics
Graduate School, Kangwon National University*

Abstract

Natural gamma strength and distribution characteristics of volcanic rocks in Jeju Island have been analyzed based on rock type, region, and time of eruption using the gamma well logging data obtained from 29 boreholes throughout the Jeju Island. The gamma strength of the Jeju volcanic rocks measured by total counts ranges mostly between 20 and 90 API. The result of analysis of gamma distribution of the Jeju volcanic rocks shows that different types of gamma logging curves were identified from the east, the west, the north and the central regions, while no data was identified from the south region. Generally gamma strength was shown as higher in the central high land and decreases gradually as it moves from the central region to outer low land in costal areas. This tendency is considered to reflect the differences in rock facies and the time of volcanic eruptions in Jeju Island. This kind of analytic study on the gamma log data in Jeju Island is shown effective in classifying rock types, and particularly in the stratigraphic sequence analysis.

□ keywords: natural gamma, total gamma log, Jeju volcanic rocks,
gamma strength, gamma distribution

감사의 글

이 논문이 완성될 때까지 부족한 저에게 끝까지 애정을 갖으시고 이끌어주시고 격려를 해주신 지도교수 김영화 교수님께 진심으로 감사드립니다. 대학원 수료 후 한참이 지났음에도 오랜 시간 사랑으로 지도해 주신 김영화 교수님, 너무 감사합니다. 또한 논문 심사와 더불어 많은 조언을 아끼지 않고 도와주신 장보안 교수님, 한국지질자원연구원 황세호 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 대학원 생활과 직장생활을 병행하면서 많은 어려움이 있었지만 만날 때 마다 항상 격려해 주시고 좋은 말씀 해 주신 조인기 교수님, 박유철 교수님께도 감사드립니다. 그리고 논문 완성을 위해 옆에서 허물없이 조언해준 시추공 지구물리실의 옥환이, 기환이에게 고마운 마음을 전합니다. 또한 많은 응원과 도움을 준 김기주 박사에게도 감사드립니다. 특히 논문작성 및 발표 등 모든 일정을 친절하게 알려 주시고 체크해 주신 지구물리학과 장선영 조교 선생님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

돌이켜 보면 시간이 참 많이도, 그리고 빨리도 흘렀구나 하는 생각이 듭니다. 늘 가슴 한구석에 자리잡고 있는 논문에 대한 부담감 때문에 잠을 설쳤던 때도 많았습니다. 너무 늦게 논문이 완성되어서 김영화 교수님께 죄송한 마음이 들 따름입니다. 감사하는 마음을 가지고 열심히 살아가는 것으로 교수님의 은혜에 보답하도록 하겠습니다.

끝으로 어려울 때나 즐거울 때나 항상 같이 있어주면서 나의 삶의 원동력이 되어준 멋진 아들 태용, 예쁜 딸 선경에게 늘 고맙다고 말해주고 싶고, 특히 힘들 때 항상 옆에서 많은 힘이 되어준 사랑하는 아내 미리에게도 감사의 말을 전합니다.

어느덧 김영화 교수님께서서 정년을 맞으셨습니다. 항상 건강하시고 못난 제자 놓지 않으시고 오늘까지 이끌어 주시어 이 논문이 완성될 수 있도록 물심양면으로 도와주신 김영화 교수님께 한없이 감사하는 마음과 함께 이 논문을 드립니다.