

방사성동위원소의 지구물리학적 응용에 관한 연구 γ - γ 검층법에 의한 지층구조에 관한연구

이 현 덕*·노 성 기*

Study on the Geophysical Research Applications Using Radioactive Isotopes (I)

Study on the Structures in Strata by Using γ - γ Logging Apparatus.

Hyun Duk Lee · Seung Gy Rho

Abstract

The gamma-gamma logging method applying in geophysical research are presented in this paper.

The logging probe assembly was designed which permits changing the source-to-detector spacing while conditions of proceeding γ - γ logging, which a collimated gamma ray source (^{60}Co , 0.5mCi and/or 2 mCi) is separated from the scintillation detector as shown in Fig. 2 and 3, size is 6.0 cm in diameter and 120.0 cm in long and the exposed parts are made of stainless steel pipe.

The results is confirmed by the experiment performed mainly in granite rock where a slightly constant shape was obtained but sometimes was shown sharpness shape for the measured scattered gamma-ray intensity.

Consequently, the experimental results are obtained an adequate intensity of scattered gamma-rays and favourable response to density change, and also very closely correspond to between core samples of the test boring and to used this method of γ - γ logging in the test bore-hole of the strata.

1. 서 론

지층이나 지하구조에 대한 상세한 부존상태는 전기 검층을 위시한 여러가지 기술적 방법으로 행하여 지고 있으나 최근에 이들의 기술적 조사 연구에 근본적인 변혁을 가져오게 되었으며 더욱이 원자핵물리학의 도입에 의하여 비약화 되었다.

여기 방사능 검층 (radioactivity logging)은 지하구조 특히 연구조사 대상물의 위치, 깊이 기타 여러가지 성질(지층의 밀도, 공극율, 고결도, 투수도 등) 등 지질학적, 지구물리학적, 또한 수리학적 자료등에 대하여 어떤 지질조건에 있어서도 정밀한 지층의 구조, 성질등 자료에 대하여 비교적 손쉽게 얻을 수 있는 것이다⁽¹⁾.

본 연구 조사에서 조사대상물의 매질중에서 γ -선의

Compton 산란작용이 그 산란매질의 체적밀도와 밀접한 관계를 갖고 있다는 Zolotov⁽²⁾의 보고에 의하여 γ - γ 검층을 하는데 최적인 γ - γ 검층기를 고안, 제작하고 검층기의 하단부에 ^{60}Co , γ -선원 0.5mCi 또는 2mCi를 내장하고 철원근방의 시험공내에서 산란 γ -방사선의 변화에 대하여 측정하고 지층의 구조상태에 대하여 연구 하였다.

저자들은 본 연구조사를 위하여 물심양면으로 협조하여 준 본 연구소의 안정옥씨와 홍능 기계공업사의 한홍섭 박사에게 감사를 드리는 바이다.

2. 이론 및 원리

γ -선은 매질층을 통과할때 주로 광전효과, Compton 산란 및 전자대생성등 작용으로 그 본래 가졌던 energy를 잃는다. 그런데 지층을 구성하고 있는 매질(원자번호

* 한국 원자력연구소

호, Z는 주로 1-30 범위내이다)에서 광전효과를 일으키는 확률이 작고, ⁶⁰Co 방사선원으로부터 방출되는 γ -선은 주로 Compton 산란작용이 중요한 인자가 되는 것이다.

Compton 산란의 확률은 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 1개의 전자에 대한 확률이므로 물질의 단위체적당의 전자의 수, 즉 전자밀도가 증가함에 따라서 그지층에 의한 산란 강도가 증대된다. 또 산란되는 γ -선의 방향 분포는 입사 γ -선의 energy에 의해 변화되고 energy의 증대에 의해서 산란각의 작은 산란의 비율이 많아지는데, ⁶⁰Co의 경우에는 90°를 넘으면 거의 일정한 산란 확률이 된다⁽³⁾. 또 Compton 산란은 입사 γ -선의 energy가 증대함에 따라서 감소된다. 따라서 γ -검층에 이용되는 γ -방사선원에는 비교적 반감기가 긴 ⁶⁰Co 방사선원 (energy: 1.17, 1.33MeV), ¹³⁷Cs 방사선원 (energy: 0.662MeV) 등이 이용되므로써 Compton 산란이 중요한 요소가 된다. 그리고 산란 γ -선의 강도는 체적밀도가 감소함에 따라 지수함수적으로 증가하게 된다. 이 원리를 이용하여 시추공내의 체적밀도 변화에 대하여 측정한다⁽⁴⁾.

γ - γ 검층계의 검층기 (logging probe assembly)는 지층의 밀도가 Compton 산란에만 영향되도록 마련하면 된다. 일반적으로 Compton 산란에 대한 평균자유행정 (mean free path)은

$$\frac{1}{\lambda_c} \propto f(E) \sum_i \frac{\rho_i Z_i}{A_i} \quad (1)$$

- 여기서 λ_c : Compton 산란에 대한 평균 자유행정
- ρ_i : i 번째의 원소의 질량밀도
- Z_i : i 번째의 원자의 원자번호
- A_i : i 번째의 원소의 질량

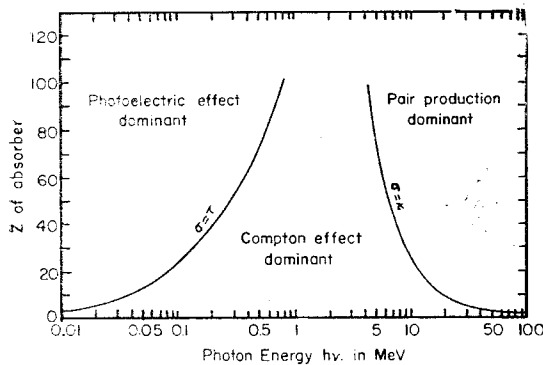


Fig. 1. Relative importance of the three major types of γ -ray interaction with a function of atomic number versus photon energy.

으로 표시된다.

$\frac{Z_i}{A_i} = \frac{I}{2}$ 이기 때문에 $\frac{1}{\lambda_c} \propto \rho$ 가 되고, Compton에 대한 평균 자유행정은 화학조성에 의하지 않고 밀도에 비례하는 것이 된다. 또 하나의 중요한 과정으로서의 광전효과인데 그것은

$$\frac{1}{\lambda_{PE}} \propto E^{-\frac{3}{2}} \sum_i \frac{\rho_i Z_i^3}{A_i} \quad (2)$$

여기서 λ_{PE} : 광전효과에 대한 평균자유행정

E : photon energy

으로 표기된다. 이것은 원자번호, Z에 강하게 지배되는 것을 나타내고있고, 특히 낮은 energy의 영역에서 중요한 영향을 주는 것이다.

Compton 산란 단면적과 광전흡수단면적의 상대적인 관계는 Fig. 1에서 보인 바와 같다. 따라서 지층의 공극상태등의 측정에 있어서는 Compton 산란단면적이 광전흡수단면적에 비하여 크게 점유되어야 된다⁽⁵⁾. 또 지층구조의 연구조사에 있어서 γ - γ 검층을 함에 있어서 산란 γ -선의 강도, I는 Fllipov⁽⁶⁾에 의하여

$$I = \frac{QC \exp(-\tau_{aver} l)}{4\pi lb} \quad (3)$$

여기서 Q: γ -방사선원의 강도

C: 검층지역의 두께에 대한 방사선원으로부터의 1차 γ -선의 흡수를 계수한 경우

τ_{aver} : γ -선 감소에 대한 평균계수(조사되어진 물질의 유효원자번호, 매질 밀도와 γ -선 조사되는 energy에 의해서 결정됨)

l: 검층기의 길이 (여기서는 방사선원과 검층기와의 거리이다)

b: γ -선원의 energy, 지층(암석)의 밀도와 지층의 유효원자번호로서 정하는 계수.

으로 나타난다.

이상에서 논한 바와 같이 전자가 산란 γ -선에 의해 표시되어지면, 원자와 양자의 수와 전자의 수가 같고, 또 중성자의 수, N와 양자의 수, Z가 아주 같아지기 때문에 양자와 중성자와의 총수인 질량수, $A=N+Z$ 가 판명되어 지는 것이다. 따라서 보통, 지층에 있어서는 전자 밀도가 거의 용적 밀도에 비례하는 것이 되기 때문에 산란 γ -선에 의해 지층의 용적밀도를 구할 수 있는 것이다.

γ - γ 검층을 함에 있어서 유효용적은 Homillius⁽⁷⁾에 의하여 검출기를 점으로 가정하고 검층기의 유효용적에 대하여 계산하고, 97%의 유효용적에 대하여 다음 식으로 나타내었다.

$$r_{eff} = \frac{1.13I}{K0.6I}$$

r_{eff} : 유효용적 (검출기에 입사한 산란 γ -선의 강도가 포화치에 달하는 용적으로서 측정용적의 의미이다)

l : 방사선원과 검출기간의 거리 (cm)

K : $\mu m \rho l$

μm : γ -선의 질량흡수 계수 (cm^2/gr)

ρ : 체적밀도 (gr/cm^3)

위의 식에서 알 수 있는 바와 같이 유효 용적은 주어진 γ -선에 대하여 방사선원과 검출기간의 거리, l 가 증가하고 체적밀도, ρ 가 감소함에 따라 증가함을 알 수 있는 것이다. 또한 γ - γ 검층에서 r -선원의 energy의 증대는 지층(암석등)의 유효용적을 증대시킬 수 있는 것이다. (즉 이 측정유효 용적의 증가는 곧 산란 γ -선의 세기가 증가하는 것을 뜻한다) 그러나 일반적으로 γ - γ 검층에 사용되는 방사선원은 3 MeV.를 넘지 않는 energy 이다.

3. γ - γ 검층계의 구성 및 제작

저자들은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 본 연구조사를 위해 무엇보다도 γ - γ 검층계에 있어서 중추적인 역할을 하는 적당한 검층기 (logging probe assembly)를 고안하고 제작하였다. 이 γ - γ 검층계의 구성은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 본 장치의 중추적 역할을 하는 검층기와 측정관독을 할 수 있는 선량율계 (rate meter) 및 측정치의 기록보존을 위한 기록제 (strip chart recorder), 그리고 Fig. 4에서 보인 바와 같이 cable winder 등으로 이루어진 것이다. Fig. 5는 본 γ - γ 검층계장치의

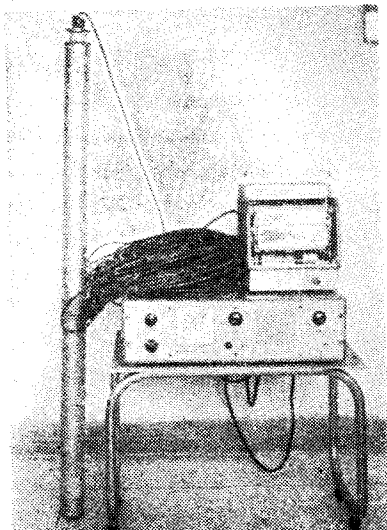


그림 2 Logging probe assembly

block diagram에 대하여 도시하였다.

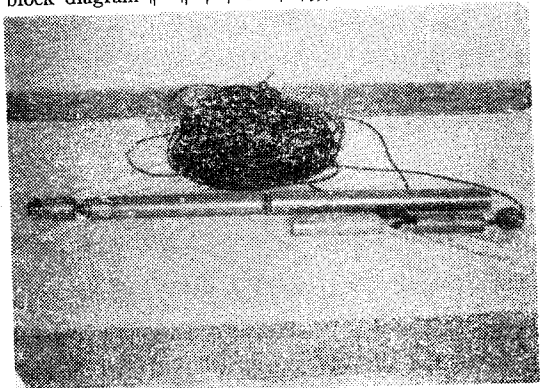


그림 3 Rate meter

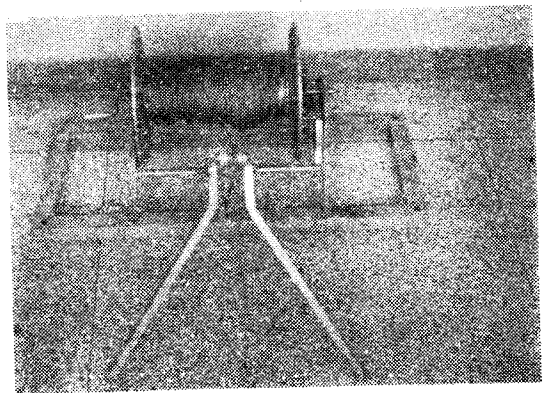
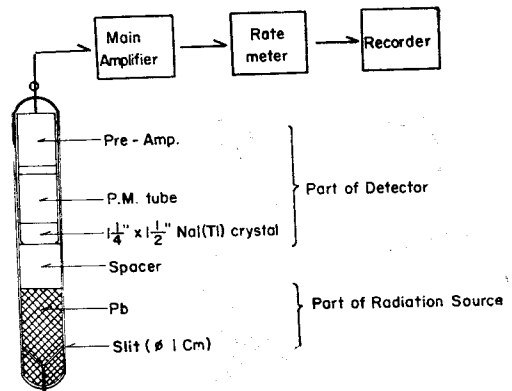


그림 4 Cable winder

1) 검층기의 제작

Fig. 2 및 Fig. 5에서 보는 바와 같이 검층기는 전장 약 1.2m의 stainless steel로 된 관(외경 약, 6cm, 관벽두께 약 4mm)내에 γ - γ 검층계에 있어서 중추적 역



Logging probe assembly

Fig. 5. A Block diagram of the γ - γ logging apparatus

활을 하는 scintillation detector, photomultiplier tube (RCA 6199) 및 pre-amplifier로 구성되고, 이 검출기의 하단에는 검출기에 γ -선의 영향을 가지 않도록 납으로 차폐(15cm)하고, 또 γ -방사선원을 바꾸어 넣을 수 있도록 된 adaptor로 이루고 있는 γ -방사선원부로 구성되어 있다.

(1) 검출기

산란 γ -선의 검출을 하기 위하여 검출효율이 좋은 Scintillation detector [NaI (Tl) crystal, $1\frac{1}{4}'' \times 1\frac{1}{2}''$]를 선정하고 이것을 Photomultiplier tube 머리에 광학적으로 안정되게 고착시키고, 자장의 영향을 차단시키고 또 지열의 상승에 대한 우려를 고려한 포장을 하고 또한 방수를 철저히 하였다.

(2) Pre-Amplifier

γ - γ 검출을 하기 위하여 검출기와 선량율기간에 약 120m가 되는 Coaxial cable, RG-59와 적절히 연결하여 사용할 수 있도록 Gain 100이 되도록 pre-amplifier를 설계, 제작하였다.

Fig. 6는 본 pre-amplifier의 전자회로도이며, 이는 직경 50mm의 원통내에 내장하고 완전밀폐, 방수 하였다. 그리고 pre-amplifier에서 나오는 signal pulse는 120m의 coaxial cable을 통하여 지상에 있는 main amplifier에 전달, 선량율계에서 측정되고 측정치를 읽을 수 있는 동시에 기록계에 의해 자동적으로 측정치가 기록되도록 마련하였다.

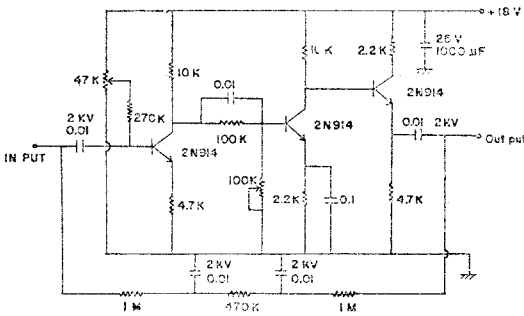


Fig. 6. A Block diagram of the pre-amplifier circuit.

(3) γ - 방사선 원부

Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 검출기의 하단에 적당한 공간을 두고 방사선원과 scintillation detector와의 사이에 15cm의 납차폐를 하고 방사선원으로 부터의 1차 γ -선의 영향이 직접으로 검출기에 미치지 않도록하

였다.

또한 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 방사선원부의 납으로 차폐된 ^{60}Co 선원은 검출기의 상단을 향해약 60° 각을 이룬, 1.0cm경의 slit 를 통하여 γ -선의 효율적인 방출 이용을 도모하도록 하였고, 방사선원부와 검출기 부분은 자연방사능 검출등 다목적용 고려하여 분리하여 사용할 수 있도록 마련하였다.

2) 선량율계 및 기록계

Pre-amplifier 단과 연결된 Coaxial cable은 측정기인 선량율계의 input 부분에 연결되어 있다. 선량율계는 검출기에 입사한 입자 1개마다 하나의 전기맥동을 증폭기를 통하여 전자측정회로에 보내어져서 단위시간적 계수하여 방사선 강도를 측정하는 것이다. 이 선량율계는 최고 측정범위가 10^5 cpm인 미국, Baird Atomic사제품의 선량율계 (model 432A)를 사용하였다. 또한 선량율계에 의해 측정된 방사선 강도를 연속적으로 기록하고 그 결과에 대하여 분석, 평가하기 위하여 선량율계의 output 단과 기록계와 연결사용 하였다. 이 기록계는 미국, Texas Instrument사 제품인 chart recorder (Recti/Riter, linear scale:0-10)를 사용하였다. (Fig. 3 참조)

3) Cable winder의 제작

Fig.4에서 보인바의 cable winder는 시추공내에서 검출기를 집어넣어 시험검출을 하는데 있어서 ^{60}Co 선원으로부터 방출된 γ -선의 지층 구조에 의존한 산란 γ -선의 검출이 선량율계에 의해서 측정되고 또한 측정된 방사선강도의 연속적인 기록보존을 위하여 기록계에 기록 시키는데 있어서 장치들의 특성 및 동작조건등을고려하여 시험검출을 하기 위한 최적의 검출속도들 50 cm/min로 결정하고 설계하여 톱니 바퀴(gear)등을 깎아 winder drum의 편과 지지대의 사이의 한쪽편에 고정 부착시켜 cable winder를 제작 완성하였다.

4. 검출방법

완성된 γ - γ 검출계 장치를 시험공상부 인근에 장치하고 또한 시험공상부단에 Cable winder를 고정장치하고 검출계의 모든 동작상태를 재차확인 한다음 선량율계의 측정범위를 10K (또는 30K), 또 시간 상수 (time constant)를 1 sec로 고정시키고 전장 1.2m가 되는 검출기를 시험공내에 집어넣어 cable winder를 이용하여 약 50cm/min 정도의 검출속도로서 지하로 하강시키면서 검출을 행하였다⁽⁹⁾.

검출기가 시험공내를 통하여 지하로 하강함에 따라서 검출기의 ^{60}Co 방사선원부로부터 방출된 1차 γ -선은 지층의 구조와 조성에 의존하여 흡수 및 산란작용을하고 2차 γ -선이 검출기의 중추적 역할을 하는 Sci-

ntillation detector에 의해 검출되어진다. 따라서 지층의 구조에 의존한 산란 γ -선의 강도가 지상에 장치된 선량율계에 의해 측정계수되어지는 동시에 기록계에도 기록되어진다. 검층을 하는동안 cable winder에 감아 놓은 steel wire에 표시된 길이의 눈금에 의해서 검층기가 시험공내를 하강하는 깊이를 읽고, 그때마다 기록계에 깊이의 표시를 행하였다.

이와같이 검층기가 시험공내를 통하여 지하로 하강하면서 1차적으로 목적인 바 깊이까지 검층을 하고, 다시 검층기를 cable winder를 이용하여 지상으로 감아 올리면서 2차적인 검층을 행하였다. 이는 시간이 비교적 오래걸리지만 측정자료에 의한 지하지층의 구조와 부존상태등에 대하여 분석 평가를 하는데 있어서 보다 정확성을 기할 수 있는 자료를 얻기 위해서였다.

5. 검층시험결과

1) 시험공 A

Fig. 7에서 검층결과를 도표에 나타낸 바와 같이 처음 지상에서부터 지하 약21m까지는 검층결과 산란 γ -선이 대체적으로 5,500cpm정도이며, 6,700—5,400cpm 정도의 변동을 가리키던 것이 22m 이하부터는 대체적으로 5,000cpm 정도이며, 때때로 계수율에 peak를 나타내는 변동을 보이고 있다. 이러한 현상은 지층 구조상에 공극 및 구멍이 있어 이로 인한 산란 γ -선의갑작스러운 증대를 뜻한다. 그리고 약 36m이하에서는 거의 일정치인 5,000cpm를 가리키고 있고, 지하 약49m로부터는 본 검층계의 측정한계(10K cpm)를 훨씬 초과하는 산란 γ -선의 증대를 나타내었으나 검층을 계속하는 도중 약 52m되는 곳에서 검층기는 정지되었다.

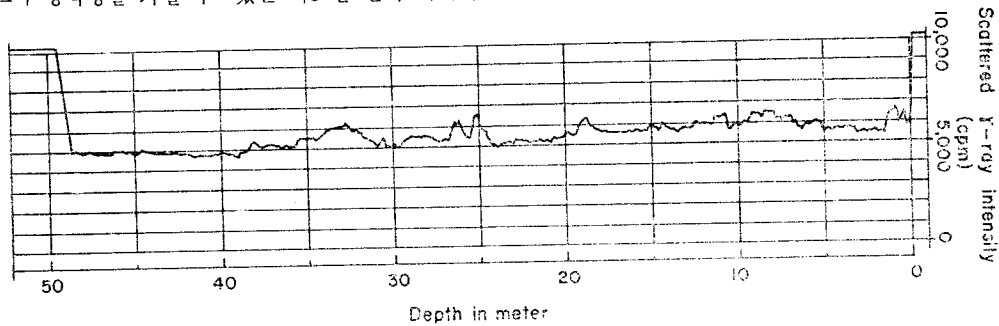


Fig. 7. In strata log of test bore-hole A using by γ - γ logging method.

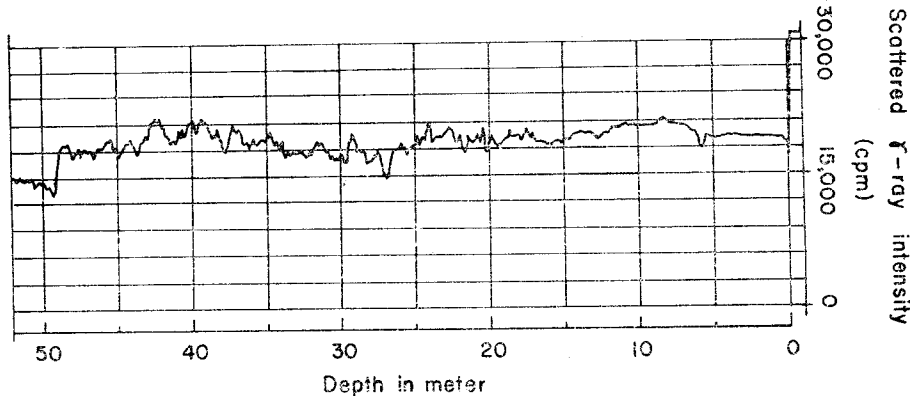


Fig. 8. In strata log of test bore-hole B using by γ - γ logging method.

2) 시험공 B

Fig. 8에서 검층 결과를 도표에 나타낸 바와 같이 산란 γ -선의 강도는 지상에서 부터 약 11m까지는 거의 평탄한 21,000—18,000cpm 정도의 약간의 변동을 보이고 있고, 약12m로부터 48m 정도까지는 21,000—15,000 cpm의 심한 변동을 가리키고 평균 18,800cpm의 산란 γ -선의 강도를 보이고 있으나, 도표에서 보는

바와 같이 때때로 peak를 가리키고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 앞에서 기술한 바와 같이 지층구조상에 공극 또는 구멍이 많이 생겨 이로인한 산란 γ -선의 갑작스러운 변동과 증대를 뜻하는 것이다. 그리고 지하 약 49m 정도에서 본 검층계의 계수율은 갑자기 12,700cpm 정도로 떨어지는 산란 γ -선의 감쇄를 나타내었는데 검층을 계속하는 도중 약 51m되는 곳에

서 역시 검층기는 정지되었다.

6. 결론 및 토의

1) 시험공 A에 대해서

검층 결과가 표시하는 Fig. 7의 산란 γ -선의 변동상태를 면밀히 분석한 결과는 검층한 시험 지역의 지층의 체적 밀도가 일정하지 않다는 것을 분명히 보여주고 있는 것이다.

지상에서 지하 약 21m까지는 대체적으로 같은 산란 γ -선의 강도를 나타내고 있고, 때때로 peak를 나타내고 있는 지역인 약 2m, 6m, 7m, 8m, 9m, 12m, 15m, 16m, 19m 정도의 지층상에 공극 및 구열상태가 있는 토양 및 풍화된 암반층으로 이루어져있는 지층이고 그 이하 약 22m로부터 약 48m까지는 거의 일정한 산란 γ -선의 강도를 나타내고 있는데 체적밀도가 일정한, 다시 말해서 단단한 암반층으로 이루어져 있고 때때로 peak를 보이는 약 26, 27, 29m 및 31m 인 곳의 암반층상에 공극 또는 구열상태가 있고, 약 33m ~ 34m인 곳의 암반층에는 보다 체적밀도가 낮은 파쇄암의 지층으로 판단되는 것이다. 약 38m인 곳의 peak를 제외하고는 약 36m이하 48m까지는 거의 일정한 산란 γ -선 강도를 가리키고 있는데 이는 지층의 치밀한 구조를 뜻하고 있다. 다시 말해서 지층의 체적밀도가 높다는 것을 의미하는 것이다.

또 지하 약 49m에서 갑작스러운 산란 γ -선의 강도가 측정한계인 10K cpm를 훨씬 초과하는 증대를 계속 나타낸 것은 앞에서도 논한바와 같이 산란 γ -선의 증대일수록 공극상태가 커진다는 데서(또한 공극율이 많아진다)본 검층결과에 대하여 분석, 평가한 결과는 자연적인 지층 구조에 기인한 공동이거나, 그렇지 않으면 인위적인 매물로 인한 체적밀도의 감소에 기인한 것이라고 판단된다.

2) 시험공 B에 대해서

Fig. 8의 산란 γ -선의 변동상태를 면밀히 분석한 결과는 지상으로부터 지하 약 11m까지는 산란 γ -선의 강도로 보아 대체적으로 체적밀도가 낮은 토양과 풍화된 암반층으로 이루어져 있는 잘다져진 지층이고, 약 6m인 곳에서 공극 또는 구열상태를 의미하는 peak를 나타내고 있는 것이다.

지하 약 12m이하에서 약 48m 정도까지는 굴곡이 있는 평균 18,800cpm이란 산란 γ -선 강도를 보이나 때때로 peak를 나타내고 있는 지역인 약 19m, 21m 26m, 27m, 30m, 32m, 34m, 36m, 38m, 44m, 45m, 47m,

48m 정도의 지층상에 공극 또는 구열 상태가 있는 것으로 판단된다. 검층결과가 표시하는 산란 γ -선의 강도에 대한 변동상태는 시험공에서의 결과와 같이 자연적인 지층구조에 기인한 것인지 또는 인위적인 것인지는 판단하기 어려우나 지층에 공극 또는 구열상태가 많이 존재하고 있어서 체적밀도가 일정하지 않다는 것을 아울러 보여주고 있는 것이다. 또한 지하 약 49m에서 산란 γ -선의 강도가 갑작스러운 감쇄를 하고 계속 측정이 정지되었다는 것은 지층구조상 시험공의 직경 ($\phi 7.5$ cm)이 이 지점에서 변화하여 일견 체적밀도가 증대된 것 같이 보이거나, 공동의 존재 때문에 산란 γ -선의 기여가 감소하였기 때문에 일견 체적밀도가 증대된 것 처럼 보이나, 앞에서의 검층결과와 잘 일치되는 지역(49m~52m 범위)으로서 본 검층결과에 대하여 분석평가한 결과는 공동이 생성되어 있기 때문에 산란 γ -선의 기여가 감소한 결과라고 판단된다.

후 기

저자들 자신은 이상에서 기술한 바와 같이, 고안 제작한 검층기와 적절하게 조립구성한 γ - γ 검층계장치를 이용하여 직접 시험공내에서 γ - γ 검층을 행하고 그결과 산란 γ -선의 강도에 대하여 분석평가하고 지하지층의 구조에 대하여 개괄적으로 음미하여 보았다. 그러나 시험제작한 검층기와 γ - γ 검층계장치의 적절한 조립 구성이 만족하게 이루어지지 않았기 때문에 오는 문제점 또한 저자들 자신은 지질학 분야엔 문외한이었기 때문에 실제 field survey와 측정결과등에 대한 제반자료의 분석, 평가에 있어서 문제점은 아직 있다고 본다.

그러나 본 γ - γ 검층의 측정결과가 자료에 대한 개괄적인 판단에 의한 결론에 지나지 않았다고 하더라도, 후일에 확인한 바에 의하면 Boring test 결과 Core의 회수에 의한 분석결과와, 저자들이 행한 동 γ - γ 검층결과에 만족할 만큼 거의 일치할 뿐만 아니라, 지하 49m-52m 사이에 실제로 인위적인 공동의 구조로 되어있다는 것을 알았다.

따라서 저자들은 이후 동 γ - γ 검층계의 보다 발전향상된 개조와 이를 이용한 여러가지 정확한 시험결과에 의한 Nomogram의 작성과 보다 정밀한 측정과 다목적 을 위한 장치등을 보완장치하고 이를 이용함으로써 지층 구조는 물론 지하자원의 부존상태의 연구등 지질학 및 지구물리학 분야에서 보다많은 자료가 얻어지리라고 믿는다.

References

- Tittle C. W., (1966), in Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics Vol. II, p. 3 IAEA
- Zolotov. A. V., (1958) AEC-tr-4475, P.165,
- Evans. R. D., in Radiation Dosimetry, Vol. 1, P.97 (1968), Academic Press, and The Atomic Nucleus, P.672 (1955), McGraw-Hill Book Co.,
- Zubek. J. A., (1966), in Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics. Vol. II, P.369, IAEA
- Fay Ajzenberg-Selove Ed., (1960), Nuclear Spectroscopy, Part I A, P.211, Academic Press.
- Fillipov. E. M, AEC-tr-4475, P.245, (1958)
- Homillius. S. J., and Lorch. S, (1958) Geophysical Prospecting, Vol. 6, P.343,
- Semmler. R. A., Bruggee. J.E. and Ricke. (1961) F.F.; TLD-14, 178, P.60
- Zaporozhets. V.M. and Sulin. V V, (1958) AEC-tr-4475, P.94,.