

뮤온 입자를 활용한 지하매설물 탐사 가능성 분석

Feasibility Analysis of Exploring Underground Utilities Using Muon

서 승 환¹ Seo, Seunghwan 정 문 경² Chung, Moonkyung
곽 기 석² Kwak, Kiseok 강 재 모³ Kang, Jae Mo

Abstract

Various geophysical exploration methods are used to determine the exact location of underground utilities, and many studies have been performed to improve the accuracy. This study analyzed the feasibility of exploring underground utilities through a new exploration method using cosmic ray muon. A prototype of a portable muon detector was manufactured by combining a scintillator and a silicon photomultiplier. Further, a calibration operation was performed on the muon count rate. The ground thickness of the ground model was measured using the muon detector prototype, where the value could be estimated with an error of about 3%, close to the actual. In addition, the theoretical basis for tomography analysis technology was analyzed to utilize the muon detector for exploring underground utilities, and a zenith angle correction method was presented. This study revealed that the technology of exploration using muon can analyze density with high resolution and will be used for exploring underground utilities.

요 지

지하시설물의 정확한 매설위치를 파악하기 위해 다양한 지구물리탐사방법이 사용되고 있고, 정확도를 개선하기 위해 다수의 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 우주선 뮤온이라는 입자를 활용하여 새로운 개념의 탐사 방법을 통해 지하매설물 탐사 가능성을 분석하였다. 신틸레이터(scintillator)와 광증배관(silicon photomultiplier)을 조합하여 소형 뮤온 검출기 시작품을 제작하고, 뮤온 입자 계수에 대한 보정 작업을 수행하였다. 시작품을 활용하여 모형 토조의 지반두께를 측정하였으며, 실측값과 약 3%의 오차로 실측값에 가까운 값을 추정할 수 있었다. 또한 뮤온 검출기를 지하매설물 탐사용으로 활용하기 위해 토모그래피 해석기술에 대한 이론적 기반을 분석하고, 천정각(zenith angle) 보정 방법을 제시하였다. 연구 결과 뮤온 입자에 의한 탐사는 밀도 그 자체를 고해상도로 해석하는 것이 가능한 기술로써 지하매설물 탐사를 위해 활용 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : Detector, Exploration, Muon, Tomography, Underground

1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 전임연구원 (Member, Research Specialist, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech., Tel: +82-31-910-0062, seunghwanseo@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원 (Member, Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engr. and Building Tech.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지하 시설물의 노후화 문제가 대두되면서 관리의 어려움도 증가하고 있다. 지하매설물은 관리주체가 분산되어 있고, 매설도면이 공유되어 있지 않을 뿐만 아니라 대부분의 매설물 위치와 깊이가 잘못 기재되어 있는 경우도 많다. 이로 인해 도로 및 굴착공사 중 인명과 재산 피해를 가져오는 사고로 이어질 우려도 있다. 이러한 이유로 지하시설물의 정확한 매설위치를 신속히 결정하기 위한 지구물리탐사방법의 개발과 도입이 중요하다(Ryu et al., 2015; Choi et al., 2021).

지반의 성상 또는 대형 토목 구조물 등의 탐사에는 지중레이더나 전기 탐사, 탄성과 탐사 등의 다양한 물리탐사가 적용된다. 이러한 방법은 대상물, 규모, 탐사심도 등에 따라 적절한 방법을 선택해야 한다. 현재는 지하매설물의 위치 및 깊이를 확인하기 위해 GPR(Ground Penetrating Radar)탐사 및 유도전류법을 이용한 조사방법이 국내외적으로 가장 많이 활용되고 있다. 그러나 지하매질이 불균질하고, 점토, 염분, 자갈 등이 많거나 전자기적 잡음이 심한 곳에서는 조사가 안 되는 경우가 빈번하며, 가탐심도(可探深度; skin depth)가 매우 낮아서 일반적으로 5m이상의 심도에 매설된 지중 매설물은 탐사가 어렵다(Hyun, 2017; Lee et al., 2015; Kim et al., 2010; Hong et al., 2015).

한편, 지하시설물의 노후화로 인한 지반 공동화 및 토목 구조물 자체의 열화가 문제시 되고, 이 문제를 해결하기 위해서는 탐사심도 10m이상, 분해능 1m 이하의 탐사 성능을 갖춘 측정방법이 필요하다. 극천부에서는 GPR탐사가 주로 활용된다. GPR탐사는 작업성이 좋고 분해능이 20~30cm로 높은 것이 장점이다(Oh et al., 2003; Hyun, 2016). 그러나 탐사심도가 약 5m 정도에 불과하다는 단점이 있다. 지진 탐사는 음향 임피던스의 대조로 인해 발생하는 회절파로 매설물을 추정할 수 있으며, 이 때 음향 임피던스는 밀도와 탄성과 속도의 곱이기 때문에 밀도 차이만 반영되는 것은 아니다(Hyun, 2017; Hyun, 2015; Park, 2013). 따라서 지반의 밀도를 추정하는 탐사 방법은 중력 탐사나 밀도 검층과 같은 몇 가지 탐사 방법에 국한된다. 도심지에서는 송전선 등에 의한 전기적 노이즈나 교통 진동 등의 진동 노이즈로 인해 전기 탐사나 반사법 지진 탐사의 능력을 발휘하지 못할 때도 있다.

본 연구에서는 기존 탐사 방법과 달리 뮤온이라는 입

자를 활용하여 새로운 개념의 탐사 방법을 활용하고자 한다. 뮤온 입자는 대기보다 더 높은 층에서 형성되는 아원자 입자(원자보다 작은 입자)로, 투과력이 매우 높은 2차 우주선이다. 에너지가 가장 높은 뮤온만이 표면에서 거의 2,000미터 깊이까지 이동할 수 있으며, 정지하거나 다른 입자로 붕괴된다(Lorenzo et al., 2020). 뮤온은 1936년 Neddermeyer와 Anderson에 의해 발견되었다(Neddermeyer, 1937). 뮤온을 활용하기 시작한 두 가지 중요한 연구가 있으며, 첫 번째는 호주의 수력발전소 터널의 암석 과부하를 측정하는 것이고, 두 번째는 이집트의 피라미드 내부 측정이다(Bugaev et al., 1998; Alvarez et al., 1970). 이후에는 원자로 내부, 화산 내부 탐사 등 다양한 산업 분야에 사용되고 있다(Seo et al. 2021). 뮤온은 X-ray 기반 방법과 달리 인공 방사선이나 방사선원을 필요로 하지 않으며, 지구 대기에서 발생하는 뮤온 플럭스에 의존한다. 지반을 관통하는 뮤온을 통해 지하매설물을 조사하는데 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 뮤온 입자를 이용하여 지하 매설물 탐사에 활용 가능성을 검토하고자 하며, 이를 위해 소형 뮤온 검출기 시작품을 제작하여 간단한 실내 실험을 수행하고 그 적용 가능성을 확인하였다. 또한 향후 지하매설물 탐사용 토모그래피 기술로 발전시키기 위해 토모그래피 해석기술에 대한 이론적 기반을 제시하였다. 뮤온은 지반공학 분야에서 생소한 개념으로 그 활용 가능성을 설명하기 전에 뮤온 입자를 활용한 탐사 원리 및 검출 방법에 대해 간략히 소개하고, 실내실험 결과 및 뮤온 토모그래피 해석기술에 대한 검토 내용을 서술하였다.

2. 뮤온 입자의 검출 원리

뮤온 입자(cosmic ray muon)는 소립자의 하나로 우주에서 쏟아지는 자연 방사선(우주선)에 포함되어 있다. 우주 공간에는 대부분 α 입자(헬륨의 원자핵)나 양성자로 이루어진 1차 우주선이 혼재해 있으며, 이것이 대기에 입사되면 대기 중 분자와 충돌하여 다양한 소립자를 발생시킨다(Bogdanova et al. 2006). 이 때 뮤온이 생성되며, 뮤온은 에너지가 높고 수명이 전자보다 길기 때문에 지표나 지중까지 도달한다. 뮤온은 지중 100m 이상의 투과능력을 가지고 있고, 검출이 용이하다(Bugaev et al., 1998). 또한 뮤온은 상시 존재하는 방사선으로 인체에 무해하며, 방사선을 취급하는 법 규제를 받지 않는 안정

된 선원으로 이용 가능하다.

우주선 뮤온 입자는 고에너지의 하전 입자로 방사선과 동일한 방법으로 검출할 수 있다(Park and Kim, 2017). 이는 감마선의 검출기 등에 이용되는 신틸레이터(scintillator)를 사용하는 방법이 있으며, 신틸레이터를 사용하는 방법에서는 신틸레이터와 광증배관을 조합한 것을 검출기라 한다. 신틸레이터는 방사선이 입사되면 빛을 발하는 물질을 말하며, 광증배관은 신틸레이터에서 발생한 빛의 신호가 매우 낮으므로 이 신호를 증폭시켜주는 역할을 한다. 다양한 물질을 신틸레이터로 이용할 수 있지만 우주선 뮤온 입자를 검출하려면 비교적 큰 사이즈의 신틸레이터가 필요하여 가공이 쉽고 경량화가 가능한 폴리스틸렌 등의 플라스틱을 많이 이용한다. 신틸레이터에서 발광된 신호는 광증배관에 의해 전기 신호로 변환되며, 이를 전기적인 펄스 신호를 통해 뮤온을 카운트한다. 검출기의 형상은 비교적 자유롭게 제작할 수 있으며, 선속(flux, 단위면적당 통과하는 입자의 양)의 계산에 단면적과 같은 정보가 필요하기 때문에 너무 복잡한 형상은 적당하지 않다. 지금까지의 사례에서는 직육면체 또는 원통형이 많다.

검출기가 하나인 경우 연직에서 수평방향까지 여러 방향에서 입사되는 뮤온 입자를 계측하게 된다. 이 방법은 매우 간편하게 계측할 수 있으며 여러 방향에서 오는 수

많은 뮤온 입자를 동시에 계측하기 때문에 매우 짧은 시간에 뮤온 입자 선속을 얻을 수 있으며, 이 방법을 전방위계수법(omni-directional technique)이라 한다. 한편, 공간분해능을 향상시키기 위해서는 검출기 2대를 사용하여 두 대의 검출기를 동시에 통과한 뮤온 입자의 수만 계측하는 방법이 있다. 이 방법은 동시계수법(time coincidence technique)이라 한다. 두 대의 신틸레이터에 따라 가능한 입체각의 범위에 입사한 우주선 뮤온 입자의 선속을 계측하기 때문에, 그 방향의 평균 밀도를 계산할 수 있다. 동시계수법은 단위시간당 계수가 전방위계수법에 비해 극단적으로 감소하기 때문에 계측 시간을 많이 필요로 한다. 이 방법은 동시에 다수의 검출기를 배치하여 효율화하여 현장에서의 사용성을 높일 수 있는 장점이 있다.

Fig. 1은 두 가지 방법의 차이를 나타낸다. 전방위계수법에서는 모든 방향에서 도달하는 뮤온 입자를 카운트한다. 한편, 동시계수법에서는 두 대의 신틸레이터를 사용해서 양 쪽의 신틸레이터를 통과한 뮤온 입자(실선)만을 계수하고, 어느 한 쪽의 신틸레이터만 통과한 뮤온 입자(점선)는 카운트하지 않는다.

우주선 뮤온 입자의 계측에서 통계적 오차는 필수불가결한 요소이다. 우주선의 발생은 방사성 핵종의 붕괴 현상과 마찬가지로 포아송 과정(Poisson process)을 통한

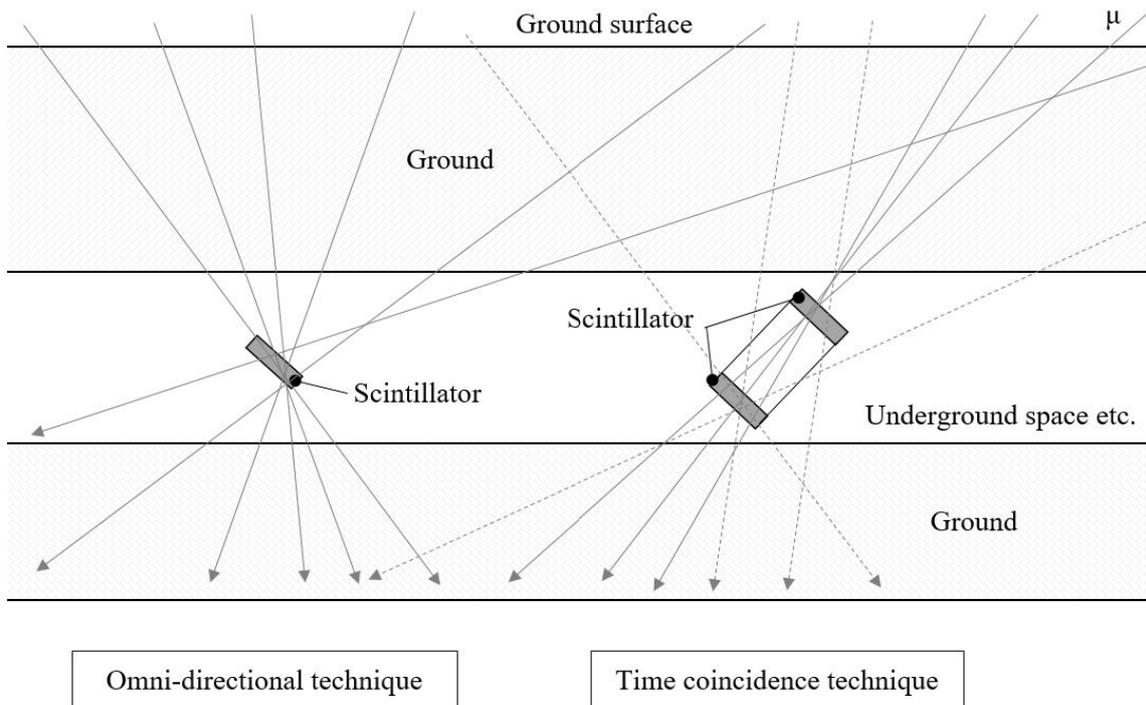


Fig. 1. Comparison of muon particle counting methods

랜덤 현상이다(Neddermeyer and Anderson, 1937; Bugaev et al., 1998). 포아송 과정은 발생할 사건의 수가 Poisson 분포를 따르는 경우를 말하며, 매우 적은 확률에 대해 사용하는 분포이다. 이는 방사선의 계측에서는 기본이 되는 것이며, 뮤온입자 선속(muon flux)에서 표면 밀도를 계산하려면 어느 선속 계산식을 사용해도 통계적으로 충분한 정밀도가 필요하다. 어떤 검출기를 사용해서 뮤온 입자를 카운트 하는 경우 카운트수(N)와 표준편차(σ)와의 관계는 식 (1)과 같이 나타내며, 이 때 카운트수 N 에 대한 변동계수(ϵ)는 식 (2)와 같이 나타난다.

$$\sigma = \sqrt{N} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\sqrt{N}}{N} \times 100(\%) \quad (2)$$

이것이 최종적으로 밀도를 추정할 때의 오차가 된다. 예를 들어, 뮤온 입자를 10개밖에 카운트하지 않는 경우의 변동계수는 약 30%, 100개 카운트하면 10%, 1,000개 카운트하면 3%가 된다. 표면 밀도(밀도가 일정한 경우의 깊이)가 증가하면 지수함수적으로 계수가 줄어들기 때문에 그만큼의 계측 시간이 필요하게 된다. 또한 변동계수를 10%에서 3%로 줄이기 위해서는 10배이 시간이 필요하고, 10%에서 1%로 줄이기 위해서는 100배의 계측 시간이 더 필요하게 된다. 따라서, 뮤온 입자를 활용한 측정 방법은 충분한 입자 포집 시간과 검출기 면적을 증가시켜 물리탐사 기술로써의 정확도를 향상시킬 수 있다. 이러한 뮤온 입자의 특성으로 인해 뮤온 입자를 활용하여 현장에 적용하는 경우 측정 대상과 현장의 측정 환경을 고려하여 검출기 면적을 결정할 필요가 있다.

3. 뮤온 입자를 활용한 탐사 원리

뮤온 입자를 이용한 탐사 원리는 뮤온 입자의 검출기를 터널 등의 지하 공간 내에 설치하고 천정각(바로 위를 0° 으로 하고 수평으로 갈수록 90° 가 되는 각도)별로 뮤온 입자의 수를 계측(계수)해서 그 장소까지의 지반 심도를 바탕으로 지반의 표면 밀도(밀도×지반심도)를 계산하는 것이다. 뮤온 입자는 항상 거의 일정한 양이 지표에 도달하며, 시간에 따른 변화는 최대 약 5% 이하이다(Minato, 1986). 지표면이 수평이고 지반의 밀도가

일정하다면 투과 거리가 커질수록 지반에 의한 흡수량도 커지기 때문에 검출기에 도달하는 뮤온 입자의 수는 줄어든다. 이 때문에 동일 심도의 계측에 대해서는 천정각(zenith angle)이 클수록(수평에 가까워질수록), 뮤온 입자의 수는 줄어든다. 한편, 지표면이 수평이지만 지반 밀도가 일정하지 않고 밀도가 낮은 영역이 존재하는 경우 그 장소를 통과한 경로에서는 지반에 의한 흡수량이 줄어들기 때문에 검출기에 도달하는 뮤온 입자의 수가 증가하게 된다. 이와 같이 천정각별로 뮤온 입자를 계수하여 계수 결과의 천정각 분포를 구하는 방법으로 지반의 밀도 분포를 구할 수 있다. 이와 같이 뮤온 입자에 의한 탐사의 원리는 단순하다. 단위시간×단위면적×단위입체각 당 물체를 투과한 뮤온 입자의 수(선속; flux)를 정확하게 계측하면 표면 밀도를 알 수 있다. 이 관계에 대해서는 Miyake식과 Minato식 두 가지 실험식이 제안되었다(Minato, 1986; Miyake et al., 1964). Miyake식에서 표면 밀도를 $h(hg/cm^2)$, 바로 위를 0 으로 하고 수평을 90° 로 했을 때의 각도(천정각; zenith angle)를 θ 로 하면 뮤온 선속 $I_\mu(h, \theta)$ 는 식 (3)과 같다.

$$I_\mu(h, \theta) = \frac{A_M}{h+H} (h \sec \theta + a)^{-\alpha} \exp(-\beta h \sec \theta) \quad (3)$$

여기서, $A_M = 174 (/cm^2/s/sr)$, $H = 400(hg/cm^2)$, $a = 11(hg/cm^2)$, $\alpha = 1.53$ (무차원), $\beta = 8 \times 10^{-4}(cm^2/hg)$ 이다. 계산 결과는, 단위면적(cm^2)·단위시간(s)·단위입체각(sr)당 뮤온 입자의 수로 나타난다.

한편, Minato식에서 뮤온 선속 $I_\mu(h, \theta)$ 은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$I_\mu(h, \theta) = I_{\mu 00} \cos^n \theta \cdot \exp\left(-\frac{h}{\Lambda(h)}\right) \quad (4)$$

여기서, $\Lambda(h) = A + Bh + Ch^2$, $n = \alpha + \beta h$, $I_{\mu 00} = 0.00723 (/cm^2/s/sr)$, $A = 17.61(cm^2/hg)$, $B = 0.1404(cm^4/hg^2)$, $C = -7.069 \times 10^{-5}(cm^6/hg^4)$, $\alpha = 1.495$ (무차원), $\beta = 0.02018(cm^2/hg)$ 이다.

식 (3)와 식 (4) 모두 실측데이터로부터 얻은 실험식으로 각 계수는 I_μ 가 선속을 나타낼 수 있도록 단위를 조정하였다. 식 (3)와 식 (4)는 복잡한 형태로 표현된 것처럼 보이지만, 표면 밀도 h 가 지수함수 안에 마이너스 형태로 들어가고, 거기에 천정각 θ 의 코사인 멱급수가

곱해져 있을 뿐이다. 즉 입사하는 각도와 표면 밀도에 따라서 지수함수적으로 선속이 감소하는 것을 나타낸다. 표면 밀도의 단위는 hg/cm^2 (헥토그램/제곱센티미터)를 사용하는 경우가 많다. 밀도 단위로 g/cm^3 , 거리 단위로 m 를 사용하면 cm 와 m 에는 100배의 차이가 있기 때

문에, h (hecto)를 사용하면 그대로 곱셈이나 나눗셈을 할 수 있어서 사용이 편리하다. 뮤온 입자의 입사 각도를 알고 있다면 식 (3) 또는 식 (4)를 사용하여 표면 밀도 h 를 계산할 수 있다. 투과 거리는 도면이나 측량 등을 통해서 구할 수 있기 때문에 표면 밀도를 투과 거리로 나누면 경로에 따른 평균 밀도를 알 수 있다. 이것이 뮤온 입자 탐사의 핵심이다. 식 (3) 및 식 (4)로 구한 선속은 표면 밀도 h 에 대해 거의 비슷한 값을 나타내지만, 투과거리 5m 까지는 Minato식의 적용성이 높고, 그 이상은 Miyake식이 많이 활용된다(Fig. 2).

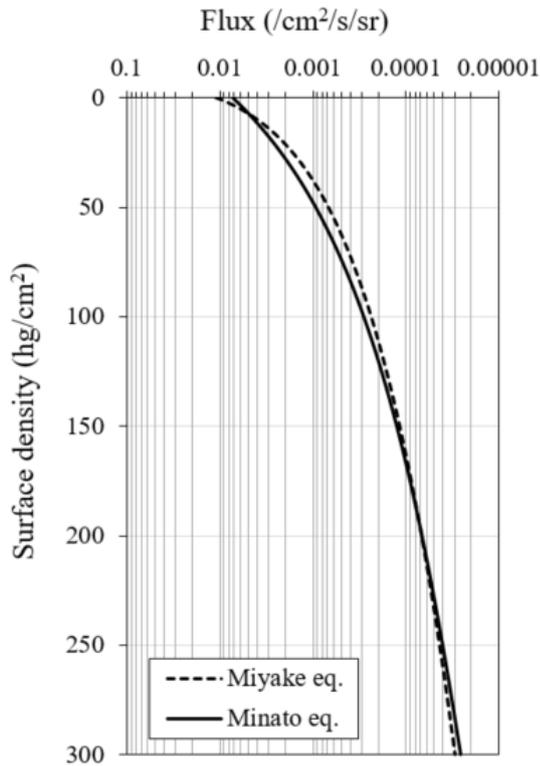


Fig. 2. Relationship between vertical muon flux and surface density

4. 실내실험

4.1 뮤온 검출기 시작품 제작

본 연구에서는 $5cm \times 5cm$ 크기의 신틸레이터와 실리콘 광증배관(silicon photomultiplier, SiPM)을 사용하여 발생한 빛을 전기신호로 변환하였다. 제작한 뮤온 검출기 시작품은 Fig. 3과 같으며, 시험 계측기의 중량은 약 1.2kg, 전체 높이는 약 23cm이며, 천정각에 따른 입자 카운트를 위해 각도별로 회전이 가능한 형태로 설계하였다. 계측 정확도와 현장 사용성을 증가시키기 위해 동시계수법을 적용하여 상하부에 각각 신틸레이터가 있고, 두 개의 신틸레이터를 동시에 통과한 뮤온 입자를 카운트할 수 있도록 프로그래밍하였다. 검출기 두 대를



Fig. 3. Photo and configuration of the muon detector prototype

동시에 통과한 입자는 나노초 단위로 동시 통과 입자를 계산하였다.

플라스틱 신틸레이터로 계수하는 경우, 저에너지의 자연감마선 등을 제거하기 위해 식별기를 사용하고 있지만, 현장의 작업 조건(온도나 전원의 불안정성)에 따라 식별의 분해능이 저하된다. 이러한 문제를 피하기 위해 플라스틱 신틸레이터의 두께를 두껍게 해서 분해능의 저하를 최소화 하였다. 이에 따라 시작품에 사용한 플라스틱 신틸레이터의 비중은 1.03으로 하였다.

4.2 시작품 교정시험

플라스틱 신틸레이터 두 개를 사용한 뮤온 입자 측정



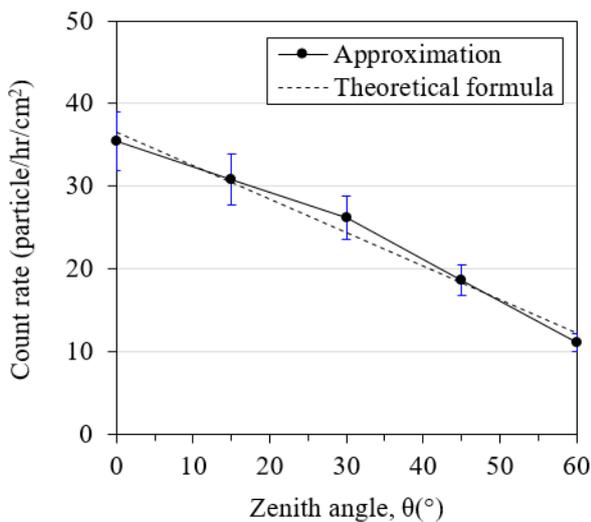
Fig. 4. Calibration experiment for detectors

기는 개별 검출기의 편차나 두 검출기의 위치관계의 오차 등에 따라 계수효율이 다르게 나타날 수 있으므로 제작한 각각의 검출기 별로 특성을 사전에 분석해야 한다. 정확한 계수효율을 얻기 위해서는 균질한 밀도의 무한으로 확장된 매질 아래서 천정각 분포를 측정하는 것이 이상적이지만 현실적으로 실험 구현이 어렵다. 따라서, 공기 중에서의 천정각 분포를 측정해서 계수효율을 산출하였다. 실험은 시작품 2대(A, B)를 사용하였으며, 각 천정각(0, 15, 30, 45, 60)도 해당하는 뮤온 카운트수를 측정하였으며, Fig. 4는 그 결과를 나타낸다.

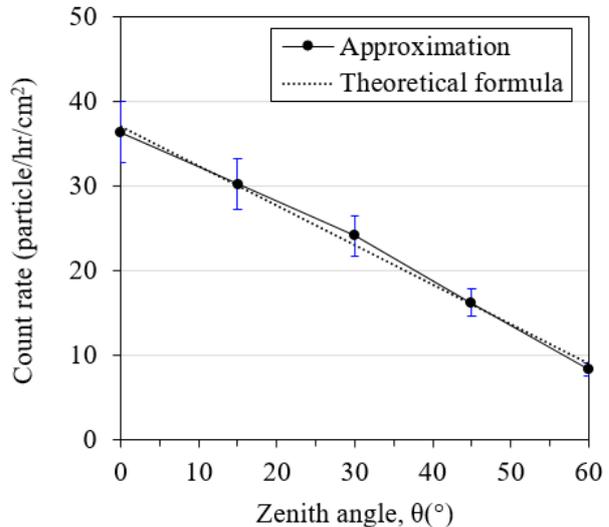
뮤온 입자 계수 효율은 시작품을 통해 측정된 값의 평균값과 전절에 설명한 Miyake식의 값을 이용하여 도출하였다. 시작품 A에서 1.084, 시작품 B에서 0.945로 나타났다. 계수효율이 1을 초과하는 것은 신틸레이터 측면으로부터 입사되는 입자에 의한 것으로 판단된다. Fig. 6에서 분홍색선으로 표시된 경로는 상단 신틸레이터의 측면으로 들어와 하단에 도달하는 입자의 경우를 나타내며, 이러한 경우 교정시험 결과와 같이 계수효율이 1을 초과할 수 있다. 이러한 측면부에 입사되는 입자를 보정해주기 위해 측면부를 고려한 입체각(solid angle) Ω 와 Ω_s 는 Fig. 5와 같이 계산할 수 있다. 사용하는 신틸레이터 크기와 검출기 사이 거리 정보를 활용하여 입체각 Ω 내에 입사되는 뮤온만 고려해줄 수 있다.

4.3 실내실험 결과

교정시험을 통해 얻은 계수효율을 이용해서 모형 토



(a) Muon detector prototype A



(b) Muon detector prototype B

Fig. 5. Measurement result of muon count rate for prototype detectors

조의 지반두께를 추정하는 간단한 실험을 실시하였다. 타목적으로 제작된 모형 토조에 주문진 표준사로 구성된 지반두께를 본 연구에서 제작한 뮤온 검출기를 활용하여 측정하였다(Fig. 7). 토조 모형 하단에 검출기를 두고 측정하였으며, 천정각도를 0도로 하여 6시간씩 10회 측정하였다. 측정 결과 뮤온 입자의 평균값은 시간당 32개를 얻었으며, Minato식을 사용하여 면 밀도를 계산한 결과 $1.04\text{hg}/\text{cm}^2$ 으로 나타났다. 모형 토조의 지반은 주문진표준사로 구성되어 있고 밀도를 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 가정하면 지반의 두께는 약 65cm가 된다. 실제 모형 토조의 지반 두께를 측정하면 67cm로 실측값에 가까운 값(오차 약 3%)을 얻을 수 있었다.

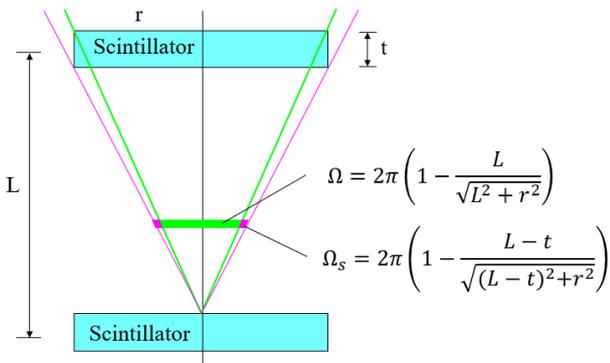


Fig. 6. Solid angle calculation with side incidence of detector

5. 지하매설물 탐사를 위한 뮤온 토모그래피 해석 기술 제안

5.1 입사각 의존성

Fig. 8(a)과 같이 뮤온 입자의 계수는 검출기에 대한 입사각 의존성이 있다(Lee et al., 2021). 두 검출기를 동시에 통과하는 뮤온 입자는 검출기에 대해서 수직이 가장 많이 카운트되며, 입사각이 커지면서 그 수는 줄어든다. Fig. 8(b)는 실험을 통해 검출기 각도를 조절하여 카운트되는 입자의 평균값을 통해 입사각에 대한 계수율을

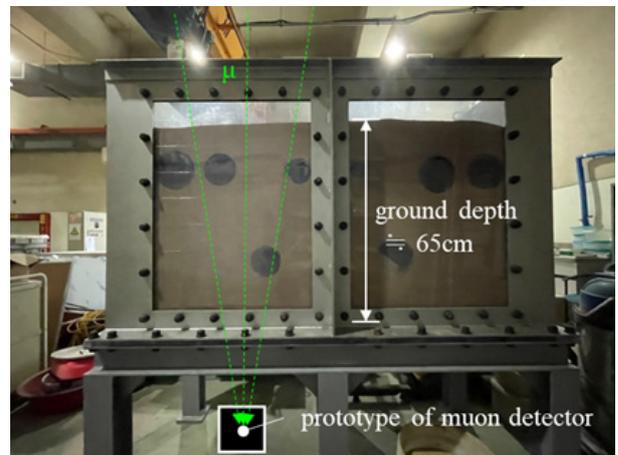
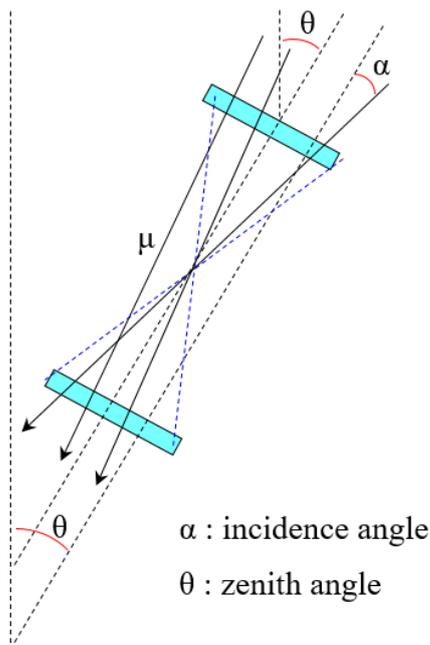
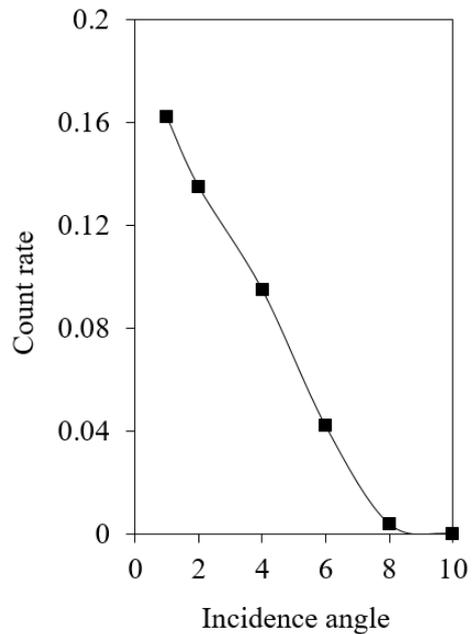


Fig. 7. Model test using prototype muon detector



(a) Incidence angle dependency



(b) Test result of prototype detector

Fig. 8. Effect of the incidence angle of muon detector

을 나타낸 것이다. 계수율을 모든 입사각으로 적분했을 때 1이 되도록 정규화 하였다. 뮤온 입자는 통과하는 입사각에 따라 계수 효율이 달라지므로 입사각에 따른 계수 효율을 적용함으로써 보정이 가능할 것이다.

또한 두 검출기에 따른 입사각 의존성은 동심원 위의 계수율을 더한 것으로 표현할 수 있을 것이다. 2차원 토

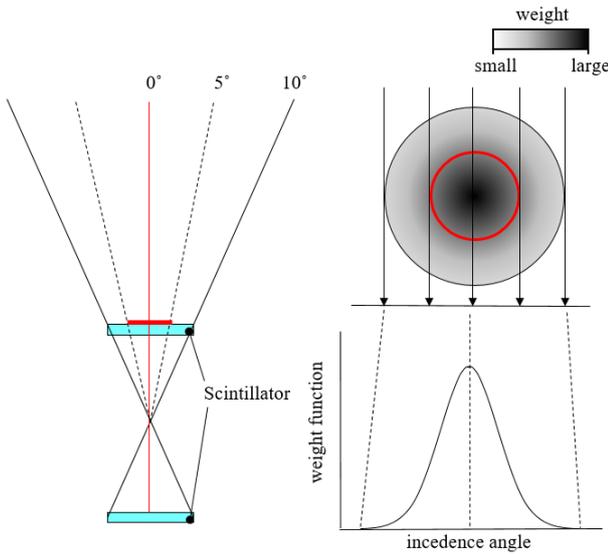


Fig. 9. Conceptual diagram of weight function by the effect of incident angle

모그래피를 해석할 때 입사각의 의존성은 Fig. 9와 같이 동심원 형태로 2차원에 투영하고 단면의 각 지점의 값을 더함으로써 입사각과 가중치 함수의 형태로 표현할 수 있을 것이다. 검출기의 지오메트리에 따라 결정되는 입체각 내부의 셀(Fig. 9에서 빨간색으로 표시된 부분)에 대하여 2차원의 입사각 의존성을 가중치 함수로 표현하여 토모그래피 해석에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5.2 천정각 보정 알고리즘

뮤온의 입사각 의존성을 고려하여 각 천정각에 대한 면 밀도를 계산하기 위한 알고리즘을 검토 하였다. 가장 먼저 준비된 검출기의 지오메트리에 따라 입체각(solid angle) 안에 무작위로 1000개 방향의 투과경로를 설정한다. 이 투과 경로에 대해 입사각에 따른 가중치를 곱한다. 모든 투과경로를 더하여 1000으로 나누어 평균 투과거리를 구하고, 이 투과거리를 천정각의 코사인으로 나누는 것과 지반의 평균 밀도를 곱하여 면 밀도를 계산할 수 있다. Minato식을 이용하여 계산한 면밀도로부터 계측시간 × 입체각 × 검출기 면적 × 계수효율을 곱하여 뮤온 계수를 구하고, 실측한 계수와 맞는 밀도를

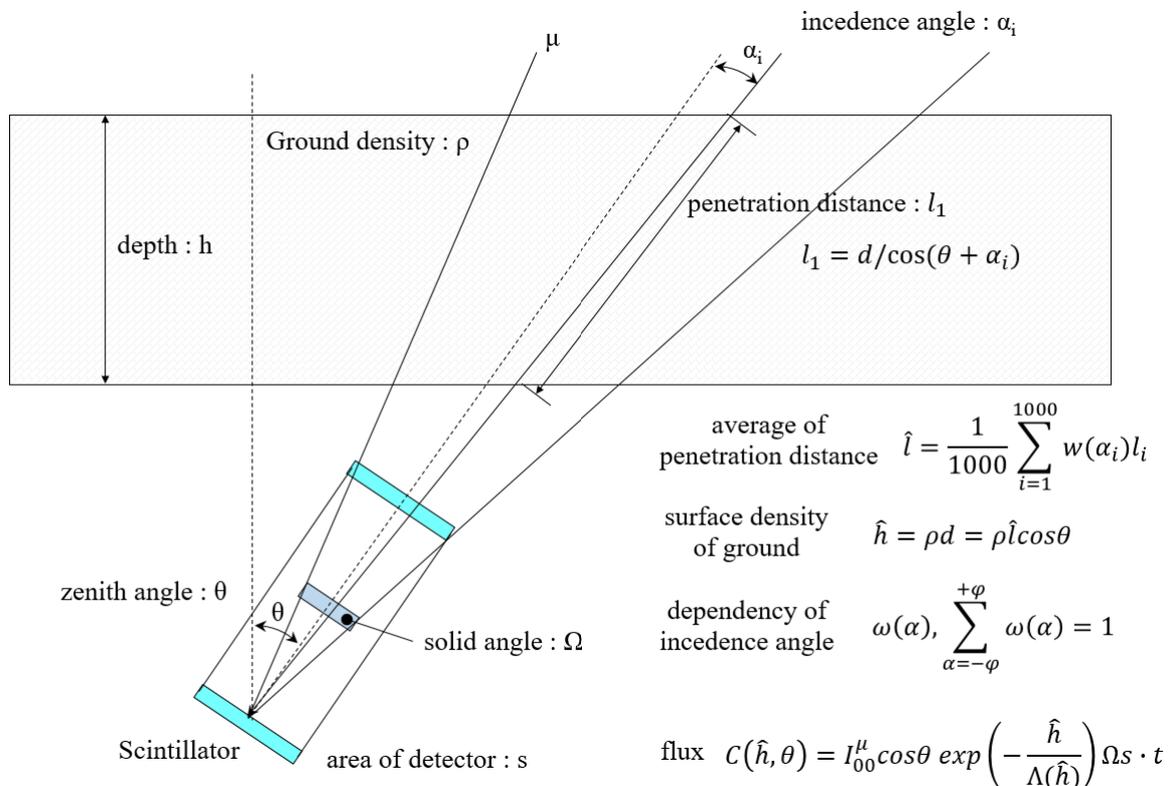


Fig. 10. Geometric relationship among muon detector, solid angle, and penetration distance

지반의 평균밀도로 산정한다. 이러한 검출기, 입체각, 투과거리와 천정각 보정에 대한 관계는 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다.

5.3 면밀도 계산방법

천정각과 가중치 함수의 관계를 Fig. 11과 같이 나타내었다. 토모그래피를 해석할 때는 해석 단면을 격자 모양으로 분할한다. 분할된 격자 모양의 사각형을 셀로 삼는다. 특정 층을 투과하는 경로에 대한 밀도는 경로의 중심이 위치하는 셀의 밀도로 대표된다. 단, 특정 층 내에서의 경로를 따르는 미세한 분할은 고려하지 않는다. 입사각에 대해서는 $-10^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ$ 의 범위에서 0.5° 간격으로 분할한다. 임의의 입사각(j 번째의 입사각은 α_j)에 대한 k 번째의 층(i 번째의 셀) 내의 h_{ij} 는 면 밀도의 정의에 따라 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, ρ 는 지반의 밀도, ω 는 입사각 함수, l 은 입자의 투과거리, θ 는 천정각, α 는 입사각, dz 는 셀의 높이를 의미한다.

$$h_{ij} = \frac{w_j \rho l_j}{\cos(\theta + \alpha_j)} = w_j \rho_i dz \quad (5)$$

이 h_{ij} 를 요소 면밀도라 가정하고 전체 관측되는 면밀

도는 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 p_{ij} 는 경로가 i 번째인 셀을 지나면 1, 지나지 않으면 0이 된다.

$$h = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^n p_{ij} w_j \right) \rho_i dz \quad (6)$$

6. 결론

본 연구에서는 뮤온 입자를 활용하여 지하매설관 탐사의 적용 가능성을 분석하였다. 이를 위해 뮤온 검출기 시작품을 제작하고, 검출기 교정과 교정 성능 확인을 위한 모형 토조의 지반 두께를 측정해보았다. 또한 향후 뮤온 검출기를 지하매설물 탐사용으로 활용하기 위해 토모그래피 해석기술의 이론적 기반에 대해 분석 및 제안하였다. 이에 본 연구에서는 다음과 같은 주요 결론을 도출하였다.

- (1) 뮤온 입자는 상시 존재하는 방사선으로 인체에 전혀 무해하며, 방사선을 취급하는 법 규제를 받지 않는 안정된 선원으로서 이용 가능하다. 지중 100m 이상 투과할 수 있는 에너지를 갖고있고, 검출이 용이하여 물리탐사 기법으로 활용할 수 있다. 또한 뮤온 입자는 물질 속에서도 직진하는 성질로 콘크리

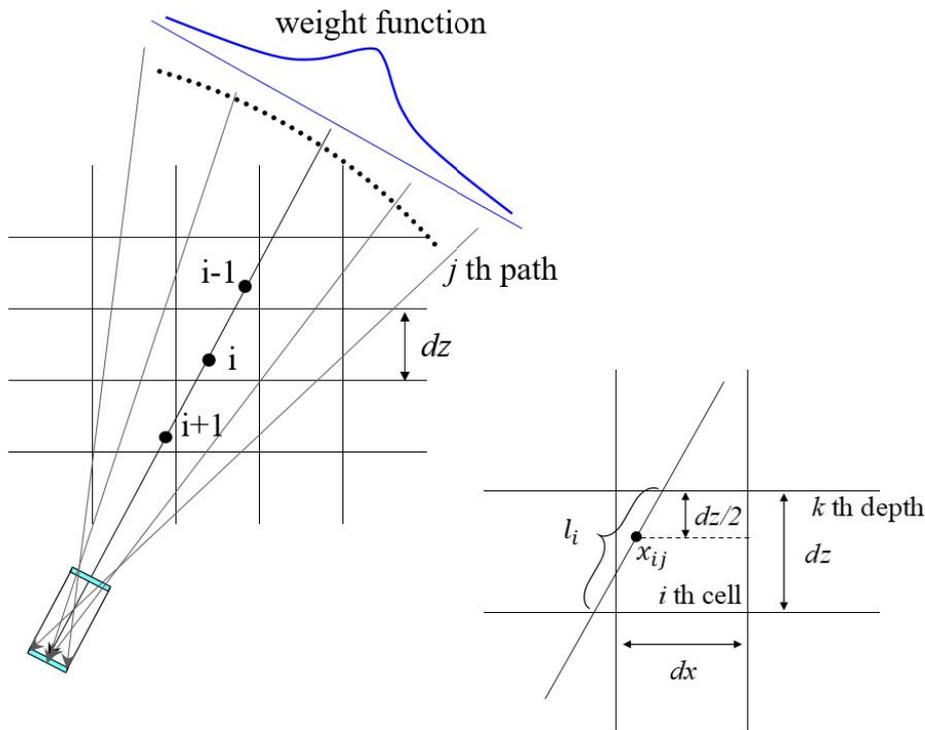


Fig. 11. The relationship between zenith angle and weight function

트, 철근 등을 통과할 때도 매우 미소 산란만 발생하여 지하매설관 탐사용으로 활용하기 적절한 탐사 방법으로 판단된다.

- (2) 본 연구에서 신틸레이터와 광증배관을 조합하여 뮤온 검출기 시작품을 제작하였고, 포집되는 뮤온 입자 수를 교정하고 간단한 실험을 통해 지하매설물 탐사 적용 가능성을 확인하였다. 본 연구에서 제작한 시작품의 신틸레이터는 5×5cm 크기로 측정 정확도와 정밀도를 높이기 위해서는 충분한 양의 뮤온 입자를 포집해야 한다. 이를 위해서는 측정시간을 길게 하거나 신틸레이터의 크기를 증가시키는 방법을 선택할 수 있다. 따라서 실시간으로 측정해야 하는 영역에서는 사용하기 어려울 수 있다. 하지만 동시계수법의 검출기를 멀티채널로 활용하는 경우 측정시간의 제약을 극복할 수 있을 것이다.
- (3) 뮤온 입자를 통해 지하매설물을 측정하는 경우 토모그래피 해석기술이 필요하며, 본 연구에서 지하매설물 탐사용 토모그래피 해석기술의 이론적 기반을 검토하였다. 또한 뮤온 입자의 입사각 의존성을 고려하여 측정 계수의 정확도를 높이기 위한 보정 방법을 제안하였다. 이 결과는 향후 지하매설물 탐사용 토모그래피 기술 개발에 활용될 수 있을 것이며, 향후 추가 실험연구를 통해 검증할 예정이다.
- (4) 기존 물리 탐사에서 밀도를 직접 해석하는 방법은 중력 탐사밖에 없었다. 밀도검층 방법은 보링 홀의 벽 주변의 데이터를 얻을 수 있어서 지반이나 토목 구조물의 가시화가 가능할 정도는 아니다. 하지만 뮤온 입자에 의한 탐사는 밀도 그 자체를 고해상도로 해석하는 것이 가능하므로 지하매설관 탐사뿐만 아니라 다양한 분야에 응용 가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 주요사업으로 수행되었습니다(과제번호 20220078-001, 지하 공간 정보 정확도 개선 및 매설관 안전관리 기술개발).

참고문헌 (References)

1. Ryu, H.H., Kim, K.Y., Lee, K.R., Lee, D.S., and Cho, G.C. (2015), Exploration of Underground Utilities Using Method Predicting and

Anomaly, *J. of Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc.*, Vol.17, No.3, pp.205-124.

2. Choi, C., Kim, J.Y., Baek, S.H., and Kang, J.M. (2021), A Study on the Optimization Algorithm for Correlation Analysis of the Underground Utility Structure Density in Urban Areas and Recorded Ground Subsidence, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.10, No.10, pp.77-87.

3. Hyun, S.Y. (2017), A Study on Characteristics of Ground-penetrating Radar Signals for Detection of Buried Pipes, *J. of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol.28, No.1, pp.42-48.

4. Lee, W.J., Lim, S.M., Choi, Y.S., and Min, K.S. (2015), A Study on Applicability of Water Pipe Detecting Using GPR, *J. of cadastre & land informatix*, Vol.45, No.2, pp.131-147.

5. Kim, J.M., Lee, B.Y., Choi, Y.S., and Yoon, H.S. (2010), Improving the Detection of the Water Mains Underground Facilities, *J. of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol.18, No.4, pp.23-32.

6. Hong, W.T., Kang, S., and Lee, J.S. (2015), Application of Ground Penetrating Radar for Estimation of Loose Layer, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.11, pp.41-48.

7. Oh, H.C., Jo, Y.S., Hyun, S.Y., and Kim, S.Y. (2003), A Feasibility Study on the Detection of Water Leakage Using a Ground-penetrating Radar, *J. of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol.14, No.6, pp.616-624.

8. Hyun, S.Y. (2016), Laboratory Experiments of a Ground-penetrating Radar for Detecting Sussurface Cavities in the Vicinity of a Buried Pipe, *J. of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol.27, No.2, pp.131-137.

9. Park, C.H., Won, K.S., Byun, J.H., Min, D.H., and Yoon, H.K. (2013), The Investigation of Alluvium by Using Electrical Resistivity, Seismic Survey and GPR, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.9, pp.17-29.

10. Lorenzo, B., Raffaello, D., and Andrea, G. (2020), Atmospheric Muons as an Image Tool, *Reviews in Physics*, Vol.5, 100038, pp. 1-28.

11. Neddermeyer, S.H. and Anderson, C.D. (1937), Note on the Nature of Cosmic Ray Particles, *Phys. Rev.*, 51:884.

12. Bugaev, E.V., Misaki, A., Naumov, V.A., Sinogofskaya, T.S., Sinogovsky, S.I., and Takahashi, N., 1998, Atmospheric Muon Flux at Sea Level, Underground and Underwater, *Phys. Rev. D58*, 05401.

13. Alvarez, L.W. et al. (1970), Search for Hidden Chambers in the Pyramids, *Sci New Ser* 167, pp.832-839.

14. Seo, S., Lim, H., Ko, Y., Kwak, K., and Chung M. (2021), Study on the Applicability of Muography Exploration Technology in Underground Space Development, *Explosive & Blasting*, Vol.39, No.4, pp.22-33.

15. Bogdanova, L.N., Gavrilo, M.G., Kornoukhov, V.N., and Starostin, A.S. (2006), Cosmic Muon Flux at Shallow Depths Underground, *Physics of Atomic Nucl.*, 69, pp.1293-1298.

16. Park, H.W. and Kim, M.J. (2017), Advances in Dosimetry Using Scintillation Dosimeters in the Field of Radiation Therapy Medical Devices, *Bulletin of the Korean institute of electrical and electronic material engineers*, Vol.30, No.5, pp.19-27.

17. George, EP. (1955), Cosmic Rays Measure Overburden of Tunnel, *Com- monwealth Eng.* 43, pp.455-457.

18. Minato, S. (1986), Bulk Density Estimates of Buildings Using Cosmic Rays, *Appl. Radiat. Isot.* 37, pp.941-946.
19. Miyake, S., Narasimham, V. S., and Ramana Murthy, P. V. (1964), Cosmic-ray Intensity Measurements Deep Underground at Depths of (800-8400) m w.e., *Nuovo Cim.* 32, pp.1505-1523.
20. Lee, H., Youn, H., Seo, J., Kweon, M.J., and Yoon, J.H. (2021), Measurement of the Incident Angle Dependence of Muon Flux and

Calculation Using Simulation, *New Physics: Sae Mulli*, Vol.71, No.3, pp.255-262.

Received : October 31th, 2022

Revised : November 3rd, 2022

Accepted : November 3rd, 2022