

아스팔트 함량 변화에 따른 중성자 검출에 관한 연구 (A Study on the Neutron Detection by change of Asphalt Content)

김기준(Kim Ki Joon)¹⁾

요 약

본 연구에서는 아스팔트 함량 변화에 따라서 중성자 계측수가 어떻게 변화되는가를 계산하여 법적 규제 면제치인 100[μ Ci]이하의 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량측정기의 기본 설계 자료로 활용하고자한다. 이를 위하여 1차 년도에서 실시했던 설계자료를 활용하여 아스팔트 함량의 변화에 따라 중성자 계측수가 어떻게 증감이 이루어지고, 또한 감속재인 폴리에틸렌 주변에 흡수체인 카드뮴판을 설치했을 때의 계측수의 변화를 MCNP 코드를 이용하여 살펴보았다.

Abstract

In this study, the change of neutron detection can be use the basic data of asphalt content detector under the influence of the jurisdiction and usage of radioisotopes are limited of 100[μ Ci] or less. To obtain neutron detector's properties using design materials in first step phase, the change of neutron detection is to be calculated how can be increase or decrease due to the change of asphalt content, also it look over the change results which is installed absorber(cadmium plate) around moderator(polyethylene) using MCNP Code.

논문접수 : 2007. 1. 23.

심사완료 : 2007. 2. 3.

1) 정회원 : 인천전문대학 컴퓨터제어과 교수

1. 서론

ASTM의 정의에 따르면 역청이란 천연 또는 인위적인 가열처리에 의해 생긴 탄화수소의 혼합물에 탄화수소의 비금속 유도체를 갖는 가스, 액체, 반고체, 고체상을 갖는 물질로서 이황화탄소(SC₂)에 완전히 용해하는 물질이다. 특히 석유와 관련시켜 말할 경우 asphaltic bitumen은 흑색의 고체 또는 반고체의 아교상의 물질로서 가열할 경우 서서히 액화하는 물질로 정의한다.

아스팔트는 자연적으로 존재하는 천연아스팔트와 인위적으로 생산하는 석유아스팔트로나눌 수 있으며, 석유아스팔트는 천연아스팔트에 비하여 불순물도 적고 사용목적에 따라 그 성질을 조절할 수 있는 장점이 있으므로 현재 대부분의 수요를 충족하고 있다[1].

도로포장용 아스팔트는 아스팔트 시멘트, cutback asphalt, asphalt emulsion의 3가지로 구분하는데, 현재 국내에서 사용하고 있는 아스팔트 함량측정법인 아스팔트 혼합물의 추출 시험방법(원심분리법, KS F 2354)은 벤젠, 탄산암모늄 등의 용매를 아스팔트 혼합물과 함께 원심분리기에 넣은 뒤, 아스팔트 역청제와 골재를 분리하여 설계한 값과 같은 혼합물이 함유되어 있는지를 검사하는 방법이다. 이 방법은 측정오차가 크고, 측정에 오랜 시간이 소요되고, 유독성 용매를 사용하므로 인체에 유해하며 환경오염물질을 배출하는 등의 단점을 가지고 있다[2].

미국, 일본 등 여러 선진국에서는 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정기는 품질 검사의 허용오차를 만족시키는 높은 정밀도를 가지며 실시간에 아스팔트 함량을 측정할 수 있는 장점이 있지만, 높은 방사능을 가진 선원을 사용함으로 국내에서 사용할 때에는 방사성동위원소 취급 면허를 소지한 자를 선임해야 하며 장비의 사용 및 관리에도 많은 규제가 따르게 된다[2].

이미 전년도에 현재 국내의 법적 규제 면제

치인 100[μ Ci]이하의 방사성 동위원소를 이용한 아스팔트 함량측정기를 개발하기 위한 기본 자료를 생산하기 위하여 선원 및 검출기의 특성에 따라 측정기를 기하학적으로 3차원 모델링하였고, 중성자 및 광자의 입자수송을 몬테카를로 방법으로 해석하는 MCNP 코드를 이용하여 선원과 검출기의 위치, 그리고 중성자 흡수체 및 감속제의 기하학적 구조를 설계하였다[3].

따라서 본 연구에서는 아스팔트 함량 변화에 따라서 중성자 계측수가 어떻게 변화되는가를 계산하여 국내의 법적 규제 면제치인 100[μ Ci]이하의 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량측정기의 기본 설계 자료로 활용하고자한다. 이를 위하여 1차 년도에서 실시했던 설계 자료를 활용하여 다음과 같이

- 아스팔트 함량의 변화에 따라 중성자 계측수가 어떻게 증감이 이루어지고,
- 감속제인 폴리에틸렌 주변에 흡수체인 카드뮴판을 설치했을 때의 계측수의 변화를 MCNP 코드를 활용하여 각각 살펴보았다.

2. 아스팔트 함량 측정 장비

100[μ Ci]이하의 선원을 사용하여 6[%]의 아스팔트 함량을 갖는 아스팔트와 골재의 혼합물에 대해 5분간 측정하였을 경우, 0.1[%]이내의 측정오차를 갖는 아스팔트 함량 측정기의 개발을 목표로 하여 1차 설계를 완성하였다.

완성된 설계에서는 낮은 선원을 사용함으로써 줄어드는 계측수를 증가시키기 위해서 선원으로부터 방출된 중성자중 혼합물 속에서 감속된 열중성자는 열중성자 흡수체를 이용하여 제거하고, 흡수체를 통과한 중성자들을 폴리에틸렌으로 감속시킨 후 열중성자 검출기를 이용하여 검출하는 속중성자 검출방식을 이용하였다[1, 3, 4].

선원으로부터 방출된 속중성자가 아스팔트 혼합물을 통과한 후 가장 많이 검출되는 위치 결정은 그림 1과 같이 설계되었으며, 검출기로

들어온 중성자의 대부분(약 98[%])은 1[Kev]에서 20 [Mev] 사이의 에너지를 가지게 되고, 3, 4번 검출기에서 가장 높은 중성자속을 나타내고 있다.

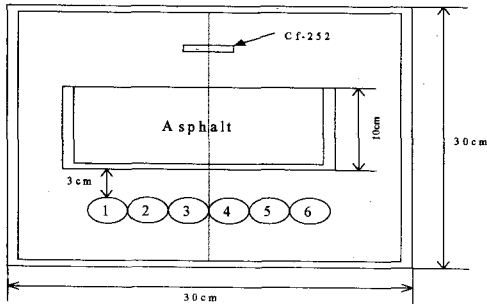


그림 1. 아스팔트 함량 측정 장비

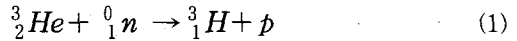
본 장치 설계에 사용된 중성자 선원으로는 ²⁵²Cf 선원을, 열중성자 검출기로서는 ³He 검출기를 각각 사용하였다. 또한, 아스팔트 혼합물 속에서 열중성자 영역으로 감속된 중성자를 제거하기 위하여 열중성자에 대한 흡수단면적이 큰 카드뮴을 중성자 흡수체로 선정하였으며, 수소의 함량이 많은 폴리에틸렌을 감속재로는 선정하여 흡수체인 카드뮴 판을 통과한 속중성자를 열중성자 검출기에서 검출하기에 적당한 에너지 영역까지 감속시킬 수 있도록 하였다.

3. 중성자 검출

중성자와 물질의 상호반응에 의해서 생성된 이차 방사선의 대부분은 하전입자로서 중성자검출기는 이러한 특성을 이용하여 입사중성자를 하전입자로 변환하여 검출기 내에서 생성된 하전입자의 수를 직접 검출함으로써 중성자의 수를 간접적으로 측정하게 된다.

본 연구에 사용된 ³He 검출기는 열중성자 측정을 위한 비례계수기로서 열중성자의 입사에 의해 생성된 하전입자가 검출기내의 기체를 이온화시키며, 이때 생성된 전자를 고전압을 이용하여 전자증폭을 시킨 후 검출기 중심부분

에 있는 양극도선에서 수집하여 계수수를 측정하게 된다. ³He 기체와 중성자의 반응은 다음 식 1과 같다.



³He 기체의 열중성자에 대한 반응단면적은 5330barn으로 붕소의 반응단면적보다 큰 단면적을 가지므로 열중성자 검출기로서 유용하나, ³He은 불활성 가스이므로 고체의 화합물을 만들 수 없고, 가스 상태로만 사용한다.

³He 계수기는 보다 높은 압력에서 적당한 기체증배의 값을 얻을 수 있으며, 이러한 계수기는 높은 검출효율이 필요한 경우에 사용된다. ³He 계수기의 일반적인 작동온도 범위는 -50~150℃이며, 특수한 경우 동작온도가 200~250℃ 만큼 높은 온도까지 확장될 수 있다.

측정원리는 He-3 와 열중성자의 반응으로 발생하는 양성자(Proton : 571 keV), 삼중수소핵 (Triton : 191 keV)의 에너지를 측정한다. 즉, He-3 와 열중성자가 반응해서 발생하는 입자는 검출기 내부가스를 이온화 시키면서 그 에너지를 잃는다. 이온화된 가스는 검출기 내부에 걸린 전기장에 의해 전자들은 양극도선 (Anode), 양이온들은 음극벽(Cathode)으로 이동한다. 그림 2는 중성자 검출기 내부에서 전자가 발생하는 메커니즘을 나타낸 것이다.

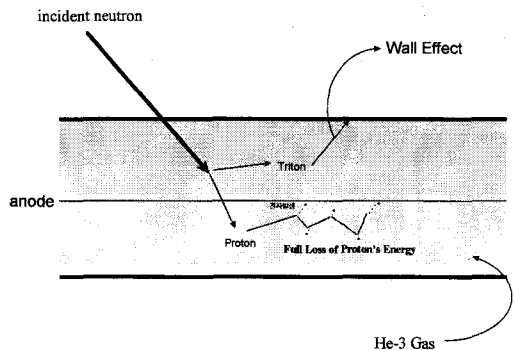


그림 2. 중성자검출기내부 상호반응 메커니즘 이 때에 검출기 내부에서는 가스증배 (Gas Multiplication) 현상에 의해 양이온 및 전자의

전하를 증폭한다. 가스 증배에 의한 전하량은 입사된 중성자의 에너지에 비례한다. 이들 전자나 양이온이 수집되는 시간의 중성자 검출회로의 설계에 있어서 회로 시정수 결정에 중요한 인자이다. 전자나 양이온이 수집되는 시간은 크게 유동시간(Drift Time)과 가스증배시간보다 매우 크므로 이온 수집시간은 거의 유동시간으로 볼 수 있다. 따라서 비례계수관의 이온 수집시간은 수식 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\textcircled{1} \quad t = \frac{(b^2 - a^2) \cdot p \cdot \ln(b/a)}{2\mu V_0} \quad (2)$$

여기서, p 는 충전가스의 압력, μ 는 ion or electron 의 mobility (입자의 평균속도/전기장의 세기), V_0 는 검출기에 인가한 전압(고전압 장치에서 공급되는 전압), b 는 음극벽까지의 검출기반지름, 그리고 a 는 양극도선의 굵기이다.

4. 중성자 계측을 위한 전산 모사

국내의 아스팔트 도로포장 시 아스팔트 혼합물의 현장배합 허용오차는 $\pm 0.3\%$ 이내의 범위를 가져야 하기 때문에 개발하고자하는 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정 장비는 배합 허용오차 범위 이내의 측정오차를 가져야만 그 측정값을 신뢰할 수 있게 된다.

방사성 동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정기의 설계는 미국 CPN사에서 개발한 AC-2R 아스팔트 함량 측정기와 국내에서 개발중인 성토시공 관리를 위한 수분/밀도 측정기의 원리와 설계를 기초로 하였으며, MCNP 코드를 이용하여 아스팔트 함량 변화에 따른 중성자 계측수 계산을 수행하였다[1, 3].

MCNP 코드는 몬테카를로 기법을 이용한

것으로 무작위적으로 발생하는 현상의 해석에 이용되며 난수(Random number)를 이용하여 인위적으로 표본을 추출함으로써 무작위적으로 진행되는 과정을 모사(Simulation)하고 이 과정에서 얻어지는 표본들의 정보를 수집 및 추정하는 방법이다[5-7].

4.1 Tally와 출력

MCNP 코드에서는 체적(Cell)내에서 계산하고자 하는 입자의 flux를 구할 때 F4 tally card를 사용한다. F4 tally를 이용하여 구하는 flux는 $\Phi(r, E, t) = v \cdot N(r, E, t)$ 이다. 여기서, v 는 입자의 속도, $N(r, E, t)$ 은 입자밀도(단위부피당 입자의 수)이다. 입자의 flux를 위치와 에너지와 시간에 대해 적분하면 식 (3)과 같다.

$$\int_v \int_E \int_t \Phi(r, E, t) dt dE \frac{dV}{V} = Wv \frac{t}{V} = WTl/V \quad (3)$$

[particles/cm³]

여기서, W 는 단위시간당 단위질량당 생성되는 입자의 수이며, Tl 은 track length이다.

위 식에서 $ds = v dt$ 라고 하면

$$\int_v \int_E \int_t \Phi(r, E, t) dt dE \frac{dV}{V} = \int_v \int_E \int_s N(r, E, t) ds dE \frac{dV}{V} \quad (4)$$

과 같은 식을 얻을 수 있으며, MCNP 코드는 그 계산결과를 출력하게 된다.

MCNP 코드는 입자가 cell 내에 있는 동안 움직이는 거리를 tally 함으로서 입자의 flux에 대한 계산을 수행하게 된다.

4.2 오차계산

MCNP 코드의 계산결과에는 N 개의 이력(history)수에 대한 입자의 평균 tally 값(\bar{x})과 상대오차(R)를 같이 출력하게 된다. 이때 입자의 평균 tally 값은 아래 식과 같다.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5)$$

여기서, N은 이력(history)수, x_i 는 이력 i에서의 tally값이다. 계산결과에 대한 상대오차는 tally 평균값의 표준편차를 tally 평균값으로 나눈 값으로서

$$\text{상대오차} \leq \frac{\text{tally 평균값의 표준편차}(S_x)}{\text{tally 평균값}(\bar{x})} = \frac{\sqrt{\frac{S^2}{N}}}{\bar{x}} \quad (6)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서, tally 평균값에 대한 표준편차(S_x)는

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

와 같은 식에서 구할 수 있으며, MCNP 코드에서 tally에 대한 분산(S^2)은 다음과 같다.

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \approx \overline{x^2} - \bar{x}^2 \quad (8)$$

위 식들로부터 상대오차(R)는 표준편차(S_x)와 비례하며, 표준편차는 $1/\sqrt{N}$ 에 비례함을 알 수 있다. 그러므로, 상대오차를 반으로 줄이기 위해서는 이력수를 4배 증가시켜야 한다. 이력수의 증가는 코드 계산시간을 증가시킴으로 MCNP 코드에서는 계산 시간을 줄이기 위해 분산 감축 기법을 사용하고 있다.

4.3 전산 모사에 따른 결과 및 검토

아스팔트 함량의 변화에 따라 중성자 계측수가 어떻게 증감이 이루어지고, 흡수체인 카드뎴판의 설치와 감속재로 폴리에틸렌을 설치하였을 때의 변화를 살펴해보았다.

아스팔트 함량은 수식 9와 10과 같이 골재의 무게에 대한 아스팔트의 무게의 비로서 나타내거나, 아스팔트와 골재 혼합물의 무게에 대한 아스팔트의 무게의 비로서 나타낸다.

$$\text{아스팔트 함량}(\%) = \frac{\text{아스팔트의 무게}}{\text{골재의 무게}} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{아스팔트 함량}(\%) = \frac{\text{아스팔트의 무게}}{\text{골재} + \text{아스팔트의 무게}} \times 100 \quad (10)$$

흡수체와 감속재를 설치한 후 아스팔트 함량이 5, 6, 7[%]인 아스팔트와 골재의 혼합물을 모사하여 함량변화에 따른 계측수를 MCNP 코드를 이용하여 계산한 결과를 그림 3에 도시하였다. 아스팔트 혼합물을 모사하는 과정에서 각 시료의 무게는 Blank sample 무게와의 차이가 10[g]이내가 되도록 조절한 후 부피를 일정하게 조절하므로 모든 시료의 밀도는 같으며, 아스팔트와 골재는 균일하게 혼합되어 있다고 가정하였다. 아스팔트 함량이 5[%]의 경우에는 4.17e5의 계측수를 얻었고, 6, 7[%]로 증가하면서 계측수는 4.25e5로 증가하고 있다.

속중성자 검출방식에서는 아스팔트 혼합물 속에서 감속된 열중성자는 흡수체를 이용하여 제거하고 흡수체를 통과한 속중성자들을 감속시킨 후 그 값을 측정하게 된다. 그러므로, 아스팔트 함량이 증가할 경우 혼합물 속에서 감속된 중성자의 수는 증가하고 이러한 중성자들은 흡수체인 카드뎴판에서 모두 차폐되므로 아스팔트 함량이 증가할수록 계측수는 감소해야 하지만 그림 3에서의 결과에서는 반대의 현상이 나타나고 있음을 감지할 수 있다.

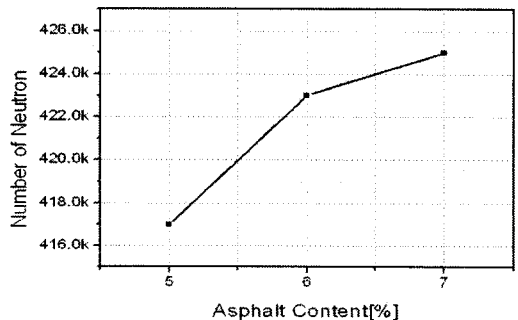


그림 3. 아스팔트 함량 변화에 따른 계측수

이와 같은 현상이 나타나는 이유를 찾기 위하여 계산의 처음 과정으로 돌아가서 흡수체와 감속재를 설치하지 않은 상태에서 아스팔트 혼

합물 속에서 감속된 중성자들을 직접 측정하는 열중성자 검출방식에 대한 모사를 한 후 아스팔트 함량 변화에 따른 계측수를 MCNP 코드를 이용하여 계산해 보았다.

그림 4는 열중성자 검출방식을 사용하였을 경우 아스팔트 함량 변화에 따른 계산결과를 나타내며, 아스팔트 함량의 증가에 따라 선원으로 부터 방출된 속중성자가 아스팔트 성분중 수소와 반응하는 수가 415에서 3242로 늘어나고, 감속되는 율이 커짐으로 인하여 열중성자 측정기에서 검출되는 수가 증가하여 계측수가 증가하고 있음을 보여주고 있다. 그 결과 아스팔트 함량의 변화를 모사하는 과정에서는 이상이 없음을 알 수 있으므로 그림 3의 결과에 대하여 반대의 경향이 아님을 알 수 있었다.

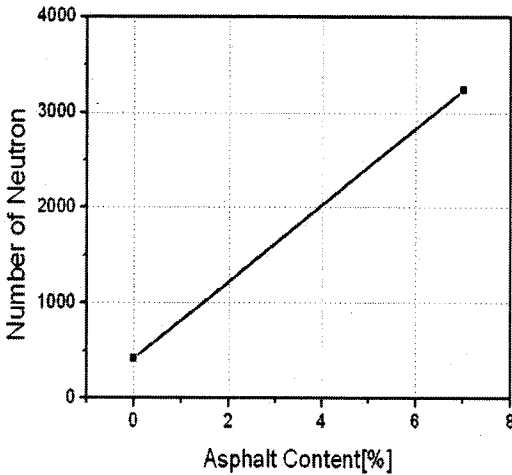


그림 4. 아스팔트 함량 변화에 따른 계측수 (열중성자 검출방식)

다음으로 검증한 것은 흡수체의 설치과정으로서 앞의 계산에서는 실험장비 설치의 용이함을 위하여 sample pan 아래에 0.3[cm] 두께의 카드뮴판을 설치하였으나, 1[eV]이하의 에너지를 가진 중성자들을 보다 많이 차폐하여 중성자 검출에 미치는 영향을 줄이기 위하여 0.3[cm] 두께의 카드뮴판으로 감속제를 둘러싼 후 아스팔트 함량 변화에 따른 검출기에서의

계측수를 계산하여 보았다.

그림 5에 나타난 바와 같이 감속제로 사용되고 있는 폴리에틸렌 주위에 카드뮴판을 씌운 경우에도 카드뮴 판을 설치하였을 경우와 마찬가지로 아스팔트 함량 증가에 따라 계측수는 3.92e5에서 3.99e5으로 증가하였다.

이러한 경향의 원인을 찾기 위해서 선원으로부터 방출된 중성자가 혼합물을 통과하여 열중성자 검출기로 입사하는 중성자속을 계산하여 보았다. 그림 6에서 나타난 바와 같이 아스팔트 함량의 증가에 따라 검출기로 입사하는 중성자속의 전체적인 양은 감소하고 있다.

아스팔트 함량의 증가에 따라 검출기로 입사하는 중성자속이 감소함에도 불구하고 계측수가 증가하는 이유는 총중성자속은 아스팔트 함량의 증가에 따라 감소하지만, 1[eV]이하의 에너지를 가진 중성자속은 아스팔트 함량의 증가에 따라 증가하므로, 열중성자에 대해 검출효율이 높은 열중성자 검출기에서의 계측수가 아스팔트 함량의 증가에 따라 증가하는 것으로 사료된다.

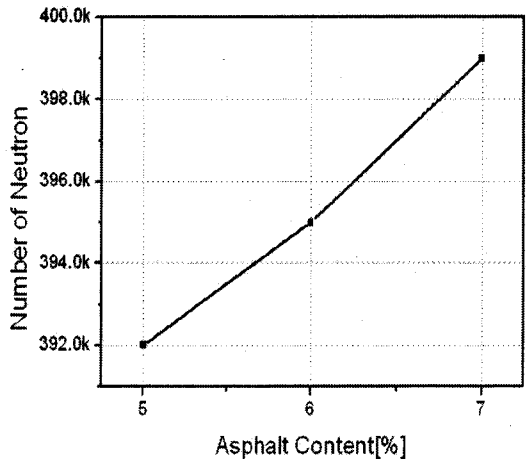


그림 5. 감속제 주위에 카드뮴을 씌운 경우 아스팔트 함량 변화에 따른 계측수

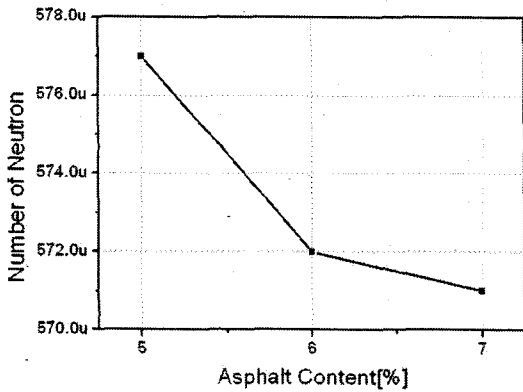


그림 6. 아스팔트 함량 변화에 따른 검출기내에서의 총중성자속

5. 결론

본 연구에서는 아스팔트 함량 변화에 따라서 중성자 계측수가 어떻게 변화되는가를 계산하여 국내의 법적 규제 면제치인 100[μ Ci]이하의 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량측정기의 기본 설계 자료로 활용하고자 한다. 이를 위하여 1차 년도에서 실시했던 설계자료를 활용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 아스팔트 함량의 변화에 따라 중성자 계측수의 증감

아스팔트 함량이 5[%]의 경우에는 4.17e5의 계측수를 얻었고, 6, 7[%]로 증가하면서 계측수는 4.25e5로 증가하였다. 이는 아스팔트 함량이 증가할 경우 혼합물 속에서 감속된 중성자의 수는 증가하고 있음을 알 수 있었다.

- 감속제인 폴리에틸렌 주변에 흡수체인 카드뮴판을 설치했을 때의 계측수의 변화

아스팔트 함량 증가에 따라 계측수는 3.92e5에서 3.99e5으로 증가하였다. 그러나 아스팔트 함량의 증가에 따라 검출기로 입사하는 중성자속

의 전체적인 양은 감소하게 되는데, 이는 총중성자속은 아스팔트 함량의 증가에 따라 감소하지만, 1[eV]이하의 에너지를 가진 중성자속은 아스팔트 함량의 증가에 따라 증가하므로, 열중성자에 대해 검출효율이 높은 열중성자 검출기에서의 계측수가 아스팔트 함량의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 이상의 설계 자료는 100[μ Ci]이하의 방사성동위원소를 이용하여 계측장비를 구성할 때 설계 자료로 충분히 활용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1]김기준 외, 성토시공관리를 위한 방사성동위원소 장비개발, 건설교통부, 1995
- [2]한국도로공사, 고속도로공사 일반시방서, 한국도로공사, 1990
- [3]김기준, 아스팔트 함량 측정을 위한 중성자 흡수체 및 감속재 설계, 한국컴퓨터산업교육학회논문지, 제 7권, 제1호, pp.7-15, 2006
- [4]한국과학재단, 도로건설 및 포장유지관리 시스템-도로구조체를 지지하는 노상 및 노체의 성토시공관리를 위한 시스템에 관한 연구(I), 한국건설기술연구원, pp. 69-76, 1990
- [5]조남진, 원자물리특강, 현진사, pp.135-170, 1993
- [6]J.S. Hendricks and J.F. Briesmeister, Recent MCNP Developments, IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 39, No. 4, pp. 1035-1040, 1992
- [7]J.F. Briesmeister, A general Monte Carlo N-particle Transport Code(MCNP) Ver. 4A, LA-12625-M, Los Alamos National Lab., 1993

1983년 광운대학교 전기공학과 공학사

1988년 광운대학교대학원 전기공학과 공학석사



1992년 광운대학교대학원 전기
공학과 공학박사

1986-1994년 한국원자력연구소
선임연구원

1994-현재 인천전문대학 컴퓨
터제어과 교수

2001-2002 Iowa State Univ.(미국)교환교수
(관심분야:컴퓨터제어, 계측기설계, 방사선이용
기기 설계)