

아스팔트 함량 측정을 위한 중성자 흡수체 및 감속재 설계

(A Design on neutron absorber and moderator for the content measurement of Asphalt)

김기준(Kim Ki Joon)¹⁾

요 약

국내에서 방사성동위원소를 사용하고자 할 때는 법적으로 규제 허용값이 100[μ Ci] 이하의 값에 맞추어 이용하도록 되어있다. 따라서 본 연구에서는 이 규제 허용값에 알맞은 아스팔트 함량 측정기를 개발하기 위한 기본 자료를 설계하였다. 선원 및 검출기의 특성에 따라 측정기를 기하학적으로 모델링하였고, 몬테카를로 방법으로 해석하는 MCNP 코드를 이용하여 중성자 및 광자의 입자수송을 해석하였고, 선원과 검출기의 위치, 그리고 중성자 흡수체 및 감속재의 기하학적 구조를 설계하였다.

Abstract

In Korea, under the influence of the jurisdiction, usage of radioisotopes are limited. The limitation is 100[μ Ci] or less. Therefore, in this study, basic data were designed, and the following data are needed in order to improve content measuring instrument which is suitable for radioisotopes limitation. Owing to the source and detector's properties, measuring instrument was designed geometrically, neutron and photon's particle transportation was analysed by using the MCNP code which is in Monte Carlo Method, also the location of source and detectors, geometrical structure of neutron absorber and moderator was designed.

논문접수 : 2006. 1. 10.
심사완료 : 2006. 2. 11.

1) 정회원 : 인천전문대학 컴퓨터제어과

1. 서론

도로 포장시 아스팔트 역청재의 함량은 포장된 도로의 내구성, 안정도, 미끄럼방지도 등의 도로성질을 결정하는 요인이 된다. 아스팔트 함량이 설계값에 비하여 낮을 경우에는 포장의 피복상태가 좋지 않게 될 뿐만 아니라 아스팔트 혼합물이 쉽게 부스러질 수 있으며, 설계값보다 높을 경우는 혼합물과 아스팔트 역청재가 유리되거나 차량의 하중에 의해 바퀴자국이 생기는 등의 문제를 일으키게 된다. 그래서 아스팔트 포장을 하기 전에 사용할 아스팔트 혼합물의 아스팔트 함량을 포장현장에서 측정하여 설계한 값으로 배합되었는지를 점검함으로써 도로의 부실공사를 사전에 예방할 수 있는 효과를 가져 올 수 있다.

현재 국내에서 사용하고 있는 아스팔트 함량 측정법인 아스팔트 혼합물의 추출시험방법(원심분리법, KS F 2354)은 벤젠, 탄산암모늄 등의 용매를 아스팔트 혼합물과 함께 원심분리기에 넣은 뒤, 아스팔트 역청재와 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 [1].

미국, 일본 등 여러 선진국에서는 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정기를 1950년대 초부터 개발하였다. 이 아스팔트 함량 측정기는 품질검사의 허용오차를 만족시키는 높은 정밀도를 가지며 실시간에 아스팔트 함량을 측정할 수 있는 장점이 있다.

그러나, 외국에서 사용중인 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정장비는 높은 방사능을 가진 선원을 사용함으로 국내에서 사용할 때에는 방사성동위원소 취급 면허를 소지한 자를 선임해야 하며 장비의 사용 및 관리에도 많은 규제가 따르게 된다[2].

본 연구에서는 현재 국내의 법적 규제 면제치

인 100[μ Ci]이하의 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량측정기를 개발하기 위한 기본 자료를 생산하기 위하여

- 선원 및 검출기의 특성에 따라 측정기를 기하학적으로 3차원 모델링하고,
- 중성자 및 광자의 입자수송을 몬테카를로 방법으로 해석하는 MCNP 코드를 이용하여 선원과 검출기의 위치, 그리고 중성자 흡수체 및 감속재의 기하학적 구조를 설계하였다.

2. 아스팔트 함량 측정

아스팔트를 측정하기 위한 기본 원리를 살펴보면, 중성자는 전하를 가지고 있지 않으므로 하전입자나 전자에 영향을 미치는 쿨롱의 힘에는 영향을 받지 않으며, 물질의 원자핵과 반응하여 흡수 또는 산란된다. 중성자가 물질과의 상호반응을 통해 에너지를 잃는 것을 감속(Moderation)이라 하며, 물질의 원자핵 질량이 작을수록 잃게 되는 에너지의 양은 커지며, 수소 원자핵과의 반응에서 가장 많은 에너지를 잃고 감속된다.

아스팔트 함량 측정은 그림 1의 개념도에서와 같이 방사성동위원소에서 방출된 속중성자가 아스팔트와 골재의 혼합물 속을 통과할 때, 혼합물에 포함된 아스팔트의 구성성분중의 하나인 수소와 중성자의 상호작용으로 감속된 중성자들을 열중성자 검출기를 이용하여 측정함으로써 혼합물 속에 포함된 아스팔트 함량을 간접적으로 측정하게 된다[3].

아스팔트 혼합물 속의 아스팔트 함량을 측정하기 위해서는 수소와의 반응에 의해 혼합물 속에서 열중성자 영역으로 감속된 중성자들을 열중성자 검출기를 이용하여 직접 측정하는 열중성자 검출방식을 일반적으로 사용하고 있다. 그러나, 사용하는 선원의 강도가 낮을 경우에는 선원으로부터 방출된 속중성자의 수가 적으므로 수소와 반응하는 중성자의 수가 적어진다. 그 결과 혼합물 속에서 감속되는 중성자의 양이 상대적으로 줄게 되므로 열중성자 검출기

에서 검출되는 중성자의 계측수도 줄게 된다. 중성자의 계측수가 줄게 되면 계측수에 대한 표준편차(One Standard deviation)가 커지므로 그에 따른 상대오차가 커지게 되어 아스팔트 함량변화에 대한 측정 신뢰도가 줄게 된다[3]. 본 연구에서는 낮은 방사선 강도를 가진 선원을 이용한 아스팔트 함량 측정장비의 개발을 목적으로 한다. 낮은 선원을 사용함으로써 계측수에 대한 상대오차가 커지는 것을 막기 위해 혼합물 속에서 감속된 중성자들을 열중성자 흡수체를 이용하여 차폐하고, 열중성자 흡수체를 통과한 속중성자를 수소를 많이 함유하고 있는 중성자 감속재를 사용하여 열중성자 검출기에서 측정하기에 적절한 에너지 영역으로 감속하여 그 계측수를 측정하는 속중성자 검출방식의 적용가능성에 대해 연구를 수행하였다. 선원으로부터 방출된 속중성자가 아스팔트 혼합물 속에서 수소 원자핵과의 반응으로 열중성자 영역으로 감속된 중성자를 직접 측정하는 열중성자 검출방식의 경우에는 혼합물 속에 포함된 아스팔트 함량이 증가함에 따라 수소의 양도 증가하므로, 중성자의 계측수는 혼합물 속의 아스팔트 함량에 비례하여 선형적으로 증가한다.

그러나, 속중성자 검출방식의 경우 아스팔트 혼합물 속에서 열중성자 영역으로 감속된 중성자들은 열중성자 흡수체를 이용하여 차폐하고 흡수체를 통과한 중성자들을 열중성자 영역으로 감속시킨 후, 열중성자 검출기를 이용하여 측정하므로 계측수는 아스팔트 함량이 증가할수록 감소하게 된다.

3. 중성자 선원 및 열중성자 검출기

본 연구에서 사용할 중성자 선원으로는 ^{252}Cf 선원을 선정하였다. ^{252}Cf 선원은 $^{241}\text{Am-Be}$ 선원에 비해 같은 방사능을 가지고 있을 때 방출하는 중성자의 개수가 많다. 가격은 비싸지만 비중성자 선원강도가 높은 ^{252}Cf 선원을 사용할 경우, μCi 단위의 선원 강도를 가진 방사성동

위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정장비를 개발할 수 있으므로, 본 연구에서는 표 1과 같은 특성을 가진 ^{252}Cf 선원을 사용하여 설계를 수행하였다.

[표 1] ^{252}Cf 중성자 선원의 특징

내 용	특징
제작회사	미국 IPL
제품번호	N-252-3
선원의 무게	0.1 μg
방사능	50 μCi
차폐체 재질	Stainless Steel 304
캡슐제품번호	3014
실제 중성자선원 물질	세라믹 물질(부피:1mm ³)

방사성 동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정장비의 열중성자 검출기로서는 ^3He 검출기를 대상으로 하였다. ^3He 검출기는 BF_3 검출기에 비해 가격이 상당히 비싸지만, 열중성자에 대한 반응단면적이 큰 ^3He 기체를 사용함으로써 검출효율이 우수하며, ^3He 검출기는 일반적인 아스팔트 혼합물의 혼합온도인 150 $^{\circ}\text{C}$ 의 높은 온도에서도 사용할 수 있다는 장점이 있으며, 그 외의 특성은 다음 표 2와 같다.

[표 2] ^3He 열중성자 검출기의 전기적 및 기계적 특성

내 용	특성
충진가스압력	3800torr
외벽물질	Stainless steel
전체길이(inch/mm)	7.35/185.7
유효길이(inch/mm)	5.16/131.0
지름(inch/mm)	1.0/2.54
연결장치	MHV
작동온도($^{\circ}\text{C}$)	-25 ~ 150
작동전압범위(Volt)	800 ~ 1200
최대 Plateau slope(%/100V)	1
튜브 전기용량(pf)	8
중량(g)	200

4. Code 해석

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

측정오차를 허용오차 범위 이내로 줄이기 위해서는 충분한 계측수와 함량 변화에 따른 계측수의 민감도가 필요하며, 이를 위해 가장 많은 계측수를 얻을 수 있도록 아스팔트 함량 측정장비를 설계하여야 한다.

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 선원 및 검출기의 위치 선정, 아스팔트 혼합물 및 구조재의 크기 계산, 아스팔트 함량 변화에 따른 계측수 계산 등을 수행하였다[2].

4.1 MCNP CODE

몬테카를로 기법은 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.

몬테카를로 기법을 이용하여 입자의 수송문제를 계산하는 MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport) 코드는 물리실험과 원자로 설계, 핵임계 계산, 방사선 차폐, 보건물리, 방사선 선량측정, 핵측정 장치의 설계 등 다양한 분야에 활용되고 있다.

MCNP 코드는 입자의 3차원 기하학적 구조에 대해 중성자, 광자, 전자의 수송 및 중성자와 광자의 복합수송 등에 대한 계산을 위해 사용하고 있으며, MCNP Code로 계산할 수 있는 중성자의 에너지 범위는 10^{-11} [Mev]~20[Mev]이며, 광자에너지 범위는 1[Kev]~1000[Mev]이다 [4-6].

4.2 핵자료와 핵반응

MCNP 코드는 연속적 에너지 핵데이터 자료(Library)를 이용한다. 핵데이터의 주된 원천은 ENDF(Evaluated Nuclear Data File)의 평가와 Livermore로부터의 ENDL(Evaluated Nuclear Data Library)와 Activation Library(ACTL)의 편집으로부터의 평가, Los Alamos에 있는 Applied Nuclear Science Group으로부터의 평가로 이뤄진다. 평가된 데이터들은 NJOY와 같은 Codes에 의하여 MCNP코드에 적절한 형식으로 처리된다.

MCNP 코드에서는 중성자 상호작용, 광자의 상호작용, 중성자 선량계측 또는 방사화(Activation), 열입자 산란 등에 대한 핵데이터 표를 이용할 수 있다. MCNP에 이용 가능한 각각의 데이터 표는 Xsdir이라는 directory file에 있으며, 사용자는 각각의 표에 대한 명시자(ZAID)를 이용하여 특정한 데이터를 선택할 수 있다. 이러한 명시자들은 일반적으로 핵의 전하 Z와 질량수 A를 포함한다.

4.3 Tally와 출력

사용자는 MCNP 코드에서 입자 흐름(Current)과 입자 선속(Flux)에 관련된 다양한 Tally를 다음과 같이 만들도록 지시할 수 있다. 입자 흐름은 문제의 어떤 표면들의 set, 표면부분, 또는 표면들의 합을 가로지르는 방향의 함수로 tally될 수 있으며, flux도 마찬가지로 cell 내에서, cell 부분에서 또는 cell의 합에 대한 tally를 구할 수 있다. MCNP에서는 아래와 같은 식으로 tally를 수행하게 된다.

$$C \int \Phi(E) \cdot f(E) dE \quad (1)$$

여기서, C는 상수, $\Phi(E)$ 는 에너지 종속 입자 flux이며, $f(E)$ 는 코드의 단면적 library에 있는 양들의 곱이나 합 또는 사용자에 의해 제공된 응답함수이다.

한 예로서 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 (2)와 같다.

$$\int_V \int_E \int_t \Phi(r, E, t) dt dE \frac{dV}{V} = W v \frac{t}{V} = WTU/V [\text{particles}/\text{cm}^3] \quad (2)$$

여기서, W 는 단위시간당 단위질량당 생성되는 입자의 수이며, TU 은 track length이다. 위 식에서 $ds = v dt$ 라고 하면

$$\int_V \int_E \int_t \Phi(r, E, t) dt dE \frac{dV}{V} = \int_V \int_E \int_s N(r, E, t) ds dE \frac{dV}{V} \quad (3)$$

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.

4.4 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.

여기서, N 은 이력(history)수, x_i 는 $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ 이력 i 에서의 tally값이다. 계산결과에 대한 상대오차는 tally 평균값의 표준편차를 tally 평균값으로 나눈 값으로서

$$\quad (5)$$

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

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

$$S_x^2 = \frac{S^2}{N} \quad (6)$$

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

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \approx \overline{x^2} - \bar{x}^2 \quad (7)$$

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 계산시간을 줄이기 위해 분산감축기법을 사용하고 있다.

5. 아스팔트 함량 측정장비의 Geometry 설계

5.1 선원 및 검출기의 위치 설계

본 연구에서는 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 하고 있다.

선원으로부터 방출된 속중성자가 아스팔트 혼합물을 통과하면서 혼합물에 포함된 아스팔트 성분중 수소와의 반응으로 열중성자 영역으로 감속된다. 그러나, 낮은 강도의 선원을 사용할 경우에는 선원으로부터 방출되어 혼합물을 통과하는 과정에서 감속된 중성자의 양이 높은 강도를 가진 선원을 사용하였을 때 보다 적으므로 이 값을 열중성자 검출기로 측정할 경우 상대적으로 적은 계측수를 얻으리라 예상된다. 계측수가 적어지면 계측수에 대한 상대오차가 커지므로 아스팔트 함량 측정에 대한 정확도가 떨어지게 된다.

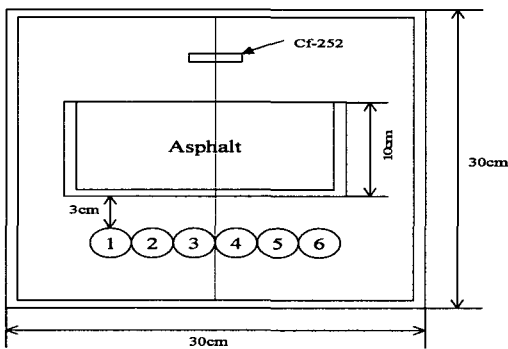
낮은 선원을 사용함으로써 줄어드는 계측수

를 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.

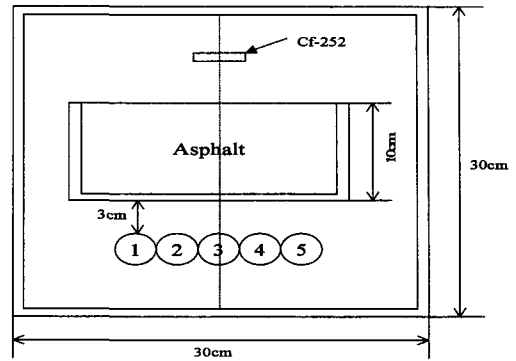
선원으로부터 방출된 속중성자가 아스팔트 혼합물을 통과한 후 가장 많이 검출되는 위치를 결정하기 위하여 그림 2의 (a), (b)와 같이 검출기를 배열하여 계산하였다.

그림 2의 (a)에서는 선원의 중심부분으로부터 6개의 검출기가 대칭이 되도록 배열하였으며, (b)에서는 선원의 중심부분에 3번 검출기를 위치시킨 후, 3번 검출기를 기준으로 4개의 검출기가 서로 대칭이 되도록 배열하였다. 그림 2의 (a)와 (b)의 경우에 대한 계산결과를 그림 3에 나타내었다. 여기에서 중성자속은 단순히 선원으로부터 방출된 속중성자들이 아스팔트 혼합물을 통과하여 검출기에 들어온 양을 MCNP 코드를 이용하여 계산한 값이다. 검출기로 들어온 중성자의 대부분(약 98%)은 1[Kev]에서 20 [Mev] 사이의 에너지를 가진다.

계산한 결과 그림 3의 (a)와 (b)의 경우 모두 3, 4번 검출기에서 가장 높은 중성자속을 나타내고 있었으며, (a)와 같이 배열했을 때 3, 4번 검출기에서 (b)의 경우보다 더 높은 flux가 검출되므로 검출기의 위치를 (a)의 3, 4번으로 결정하였다.

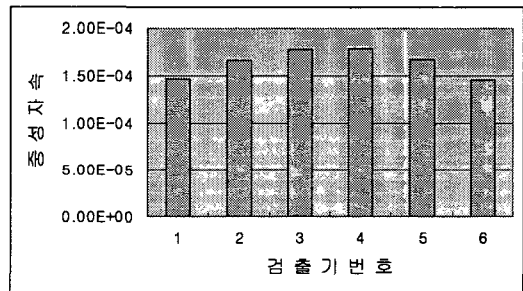


(a)

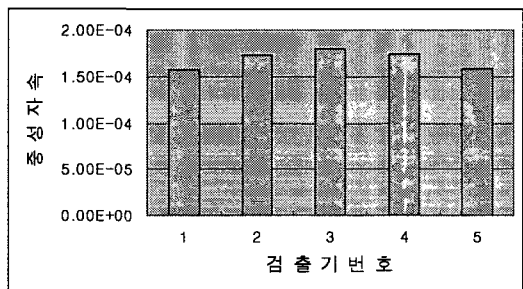


(b)

[그림 2] 검출기 위치결정을 위한 MCNP Geometry



(a)



(b)

[그림 3] MCNP 코드를 이용하여 계산한 각 검출기에서의 중성자속 (#/cm²)

5.2 중성자 흡수체 및 감속재 설계

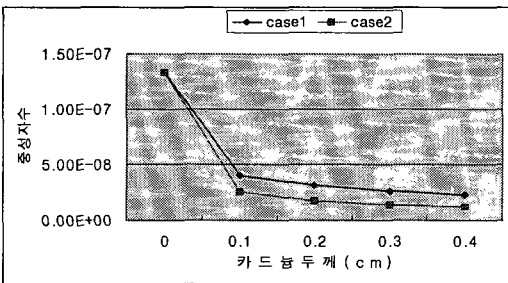
아스팔트 혼합물 속에서 열중성자 영역으로

감속된 중성자를 제거하기 위하여 열중성자에 대한 흡수단면적이 큰 카드뮴을 중성자 흡수체로 선정하였다.

중성자 흡수체의 두께를 계산하기 위하여 Sample pan 아래에 0.1[cm]두께의 카드뮴 판을 설치한 경우(Case 1)와 감속재인 폴리에틸렌을 설치할 위치의 주변에 0.1[cm]두께의 카드뮴판으로 둘러싼 경우(Case 2)를 모사한 후, 각 경우에 대해 흡수체의 두께를 0.1[cm]씩 증가시키면서 폴리에틸렌을 설치할 공간 내부로 들어오는 1[eV]이하의 에너지를 가진 중성자속을 계산하여 그림 4에 나타내었다.

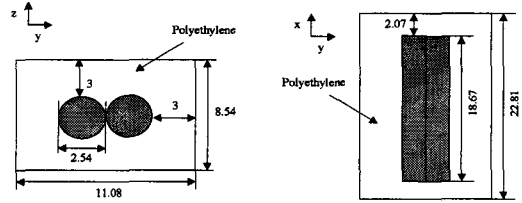
그림 4에서 나타난 바와 같이 카드뮴을 설치하였을 경우 폴리에틸렌을 설치할 공간 내부로 들어오는 1[eV]이하의 에너지를 가진 중성자속은 크게 감소하며, 흡수체를 열중성자 검출기 주변에 둘러싼 경우 차폐의 효과가 더욱 커짐을 알 수 있다.

0.3[cm] 두께의 카드뮴판을 아스팔트가 들어 있는 sample pan 아래에 설치하였을 경우, 1[eV]이하의 에너지를 가지고 폴리에틸렌을 설치할 공간 내부로 들어오는 중성자속은 카드뮴을 설치하지 않았을 경우 보다 약 80[%]정도 줄어들었다. MCNP 코드 계산 결과 0.1[cm] 두께의 카드뮴판을 sample pan 아래에 설치하였을 경우 0.0253 [eV]의 에너지를 가진 열중성자들은 흡수체에 의해 완전히 차폐되었으나, 열중성자 검출기의 중성자 검출에 영향을 미칠 수 있는 1[eV] 이하의 중성자들에 대한 영향을 고려하여 흡수체의 두께를 0.3[cm]로 하였다.



[그림 4] 카드뮴 두께 변화에 따른 중성자속 (#/cm²)

감속재로는 수소의 함량이 많은 폴리에틸렌을 선정하였으며, 흡수체인 카드뮴 판을 통과한 속중성자를 열중성자 검출기에서 검출하기에 적당한 에너지 영역까지 감속시킬 수 있는 폴리에틸렌의 두께를 계산하였다. 그림 5는 검출기 주변에 3[cm] 두께의 폴리에틸렌을 설치한 경우 중성자 검출부의 단면도를 나타내었다.



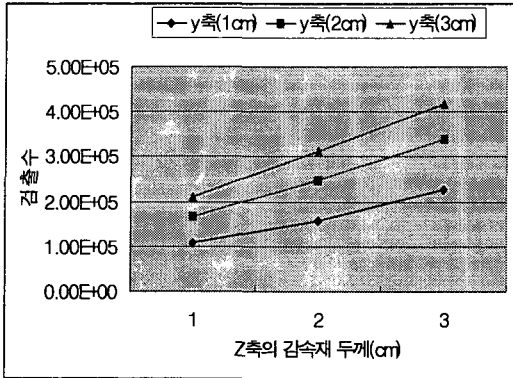
[그림 5] 중성자 검출부의 단면도

검출기 표면에서 x축 방향의 폴리에틸렌 두께는 2.07[cm]로 고정시킨 상태에서 y축과 z축 방향으로의 두께를 각각 1[cm]에서 3[cm]까지 변화시키면서 계측수를 계산하여 그림 6에 나타내었다.

계산 결과 폴리에틸렌의 두께 증가에 따라 계측수가 증가하였으며, y축 방향으로의 두께 증가가 z축 방향으로의 두께 증가에 비해 좀 더 많이 계측수를 증가시켰다. 가장 많은 계측수는 그림 3과 같이 검출기 표면에 y축과 z축 방향으로 각각 3[cm]의 폴리에틸렌을 설치했을 경우로서 4.17×10⁵개의 가장 많은 계측수를 얻을 수 있었다.

[표 4-3] y, z축으로 감속재의 두께를 화시켰을 경우에 대한 계측수

	z축(1cm)	z축(2cm)	z축(3cm)
y축(1cm)	1.07E+05	1.68E+05	2.10E+05
y축(2cm)	1.59E+05	2.50E+05	3.13E+05
y축(3cm)	2.29E+05	3.38E+05	4.17E+05



[그림 6] y, z축으로 감속재의 두께를 변화시켰을 경우에 대한 계측수

6. 결론

본 연구에서는 100[μ Ci]이하의 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량측정기를 개발하기 위한 기본 자료를 설계하였다.

기본 자료로는 기하학적인 최적 배치에 따라 선원 및 검출기를 위한 수량 및 위치를 결정하였다. 중성자 흡수체는 0.1[cm] 두께의 카드뮴판을 아스팔트가 놓여지는 sample pan 아래에 설치하였을 경우에 0.0253 [eV]의 에너지를 가진 열중성자들이 흡수체에 의해 완전히 차폐되었으나, 열중성자 검출기의 중성자 검출에 영향을 미칠 수 있는 1[eV] 이하의 중성자들에 대한 영향을 고려하여 흡수체의 두께를 0.3[cm]로 하였다. 또한 감속재 설계에서는 검출기 표면에 y축과 z축 방향으로 각각 3cm의 폴리에틸렌을 설치했을 경우로서 4.17×10^5 개의 최적의 계측수를 얻을 수 있었다. 따라서 본 자료는 아스팔트 함량 측정 장비를 제작할 때 중성자 흡수체 및 감속재의 제작에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 한국도로공사(1990), 고속도로공사 일반시방서, 한국도로공사

[2] 김기준 외 (1995), 성토시공관리를 위한 방사성동위원소 장비개발, 건설교통부

[3] 한국과학재단(1990), 도로건설 및 포장유지관리 시스템-도로구조체를 지지하는 노상 및 노체의 성토시공관리를 위한 시스템에 관한 연구(I), 한국건설기술연구원, pp. 69-76

[4] 조남진(1993), 원자로물리특강, 현진사, pp. 135-170

[5] J.S. Hendricks and J.F. Briesmeister (1992), Recent MCNP Developments, IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 39, No. 4, pp. 1035-1040

[6] J.F. Briesmeister(1993), A general Monte Carlo N-particle Transport Code(MCNP) Ver. 4A, LA-12625-M, Los Alamos National Lab.