

MCNP CODE를 이용한 아스팔트함량 측정장비의 설계 및 검증

임천일, 황주호

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지

요 약

방사성동위원소를 이용한 아스팔트함량 측정장비의 실험적인 방법에 의한 설계는 많은 시간과 비용이 소요되므로, 코드모사를 통해 설계할 경우 이러한 노력을 줄일 수 있다. 본 연구에서는 장비의 활용성을 증대시키기 위해 법적 규제 면제치인 $100\mu\text{Ci}$ 이하의 방사성동위원소를 이용하며, 6%의 아스팔트함량을 갖는 혼합물을 5분간 측정하였을 경우 0.2%이내의 함량측정오차를 갖는 장비를 MCNP 코드를 이용하여 설계하였다. 또한 코드 모사를 통한 설계를 바탕으로 장비를 제작한 후 5개의 시료에 대한 함량을 측정하고 그 결과를 비교하여 코드의 적용가능성을 검증하였다. 실험결과 6.03% 아스팔트 함량을 가진 시료를 5분간 측정하여 5.85%의 함량을 얻을 수 있었다.

1. 서론

아스팔트함량 검사는 도로포장을 하기 전에 공사현장에서 측정하여 설계한 값대로 배합되었는지를 점검함으로써 아스팔트 포장의 품질관리 및 감리를 위한 목적으로 실시하고 있다. 현재 국내에서 사용하고 있는 아스팔트함량 측정법(KS F 2354)은 측정에 오랜 시간이 소요되고, 유독성 용매를 사용함으로써 인체에 유해하며, 환경오염물질을 배출하는 등의 단점을 가지고 있다.

현재 미국, 일본 등 여러 선진국에서는 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정기를 1950년대 초부터 개발하여 현재 공사현장에서 아스팔트함량 검사를 위해 사용하고 있다. 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정기는 품질검사의 허용오차를 만족시키는 높은 정밀도를 가지며, 실시간에 아스팔트 함량을 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 외국에서 개발한 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정장비는 높은 방사능을 가진 선원을 사용함으로써 국내에서 사용할 때에는 장비의 사용 및 관리에 많은 규제가 따르게 된다.

본 연구는 현재 국내의 법적 규제 면제치인 $100\mu\text{Ci}$ 이하의 방사성동위원소를 이용한 아스팔트 함량 측정장비의 개발을 목적으로 한다. 이를 위해 검출방식 및 아스팔트함량 측정의 기본원리, 선원 및 검출기의 특성 등에 대해 조사하였고, 아스팔트 함량 측정장비의 설계를 위해 기하학적으로 3차원 모델링이 가능하며 중성자 및 광자의 입자수송을 몬테카를로 방법으로 해석하는 MCNP Code[1]를 이용하여 선원과 검출기의 위치, 아스팔트 혼합물과 구조재의 크기 및 아스팔트함량 변화에 따른 계측수 등을 계산하여 아스팔트함량 측정장비의 기하학적 구조를 설계하였다. 또한, MCNP 코드 모사를 통해 설계한 값은 장비 및 시료를 제작한 후 실험을 통해 검증하였다.

2. 아스팔트함량 측정의 기본원리

속중성자 선원으로부터 방출된 중성자들은 아스팔트 혼합물 속을 통과할 때 주로 탄성산란반응에 의해 그 에너지를 잃으며, 에너지의 손실은 충돌하는 원자핵의 질량과 반비례하므로 수소와의 반응을 통해 가장 많은 에너지를 잃게 된다. 아스팔트 혼합물 중 아스팔트의 주요 구성성분은 탄소와 수소이며, 골재의 주요 구성성분은 산소와 규소로서 아스팔트 혼합물내의 수소함량은 아스팔트의 함량에 의해 결정된다. 선원으로부터 방출된 속중성자가 아스팔트혼합물을 통과하면서 열중성자 영역으로 감속된 수는 아스팔트함량과 비례하므로 이러한 관계를 이용하여 아스팔트혼합물 속에 포함된 아스팔트함량을 간접적으로 측정할 수 있다.

3. 방사성동위원소의 선정

아스팔트함량 측정장비에 사용할 선원을 선정하기 위해 현재 중성자선원으로 많이 이용하고 있는 ^{252}Cf 선원과 $^{241}\text{Am-Be}$ 선원의 특성을 조사하여 아래의 표 1에 나타내었다. 표 1에 나타난 바와 같이 ^{252}Cf 선원은 $^{241}\text{Am-Be}$ 선원에 비해 반감기가 짧으므로 약 3년 정도 사용 후 선원을 교체해야 한다는 단점을 가지나, 비중성자 선원강도가 높으므로 낮은 강도의 선원을 이용한 아스팔트함량 측정장비 개발에 적합하다. ^{252}Cf 선원의 비방사능(Specific Activity)은 536mCi/mg 으로 $1\mu\text{g}$ 의 시료로부터 1초당 2.3×10^6 개의 중성자가 발생한다.[3]

본 연구에서는 중성자 선원으로서 ^{252}Cf 선원을 선정하였고, 실험을 위해 구입한 ^{252}Cf 선원은 $0.1\mu\text{g}$ 의 무게와 $50\mu\text{Ci}$ 의 강도를 갖으며, 핵분열 파편의 방출을 방지하기 위해 이중 캡슐의 형태로 밀봉 및 용접되어 있다.

표 1. 중성자 선원의 특성

	^{252}Cf 선원	$^{241}\text{Am-Be}$ 선원
반감기	2.65년	432년
등가선량 평균에너지	2.4MeV	4.4MeV
비중성자 선원강도	$4.29 \times 10^9/\text{sec} \cdot \text{Ci}$	$2.44 \times 10^9/\text{sec} \cdot \text{Ci}$

4. 검출기의 선정

본 연구에서는 열중성자 검출기 선정을 위하여 BF_3 검출기와 ^3He 검출기의 특성을 조사하였다.[3] BF_3 검출기는 열중성자에 대한 단면적이 3840barn 인 ^{10}B 의 (n, α) 반응을 이용하여 중성자를 계측하며, 일반적인 작동온도가 약 $-50 \sim 100^\circ\text{C}$ 정도이다. ^3He 검출기는 열중성자에 대한 단면적이 5330barn 인 ^3He 기체의 (n, p) 반응을 이용하여 중성자를 계측하며, 일반적인 작동온도가 약 $-50 \sim 200^\circ\text{C}$ 정도이다. ^3He 검출기는 BF_3 검출기에 비해 가격이 상당히 비싸지만, 열중성자에 대한 반응단면적이 큰 ^3He 기체를 사용함으로 검출효율이 우수하며, 일반적인 아스팔트 혼합물의 혼합 온도인 150°C 의 높은 온도에서도 사용할 수 있다는 장점이 있으므로 본 연구에서는 아스팔트함량 측정장비의 열중성자 검출기로서 ^3He 검출기를 선정하였다.

5. MCNP 코드를 이용한 Geometry 설계

아스팔트 도로포장시 국내의 아스팔트혼합물의 현장배합 허용오차는 $\pm 0.3\%$ 이내의 범위를 가지도록 규정하고 있다.[2] 본 연구에서는 아스팔트함량 측정오차를 현장배합 허용오차 범위이내로 줄이기 위해 몬테카를로기법을 이용 입자수송문제를 계산하는 MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport)코드를 이용하여 함량측정장비를 설계하였으며, $100\mu\text{Ci}$ 이하의 선원을 사용하여 6%의

아스팔트 함량을 갖는 혼합물에 대해 5분간 측정하였을 경우, 0.2%이내의 측정오차를 갖는 아스팔트 함량 측정장비의 개발을 목표로 장비의 기하학적 구조 및 배열에 대한 설계를 수행하였다.

5.1 검출기 위치 선정

아스팔트함량 측정장비의 housing 크기는 미국 CPN에서 개발한 아스팔트함량 측정장비의 크기 [4]를 기준으로 설계하였으며, housing내에서 선원으로부터 방출된 속중성자가 아스팔트혼합물(아스팔트함량 : 5%)을 통과한 후 가장 많이 검출되는 위치를 결정하기 위하여 그림 1의 (a), (b)와 같이 검출기를 배열하여 계산하고 그 결과를 표 2에 나타내었다.

계산 결과 그림 1의 (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.

표 2. MCNP 코드를 이용하여 계산한 각 검출기에서의 중성자속 (#/cm²)

검출기 번호	Case 1	Case 2
1	1.47E-04	1.57E-04
2	1.66E-04	1.73E-04
3	1.78E-04	1.80E-04
4	1.79E-04	1.74E-04
5	1.67E-04	1.58E-04
6	1.45E-04	

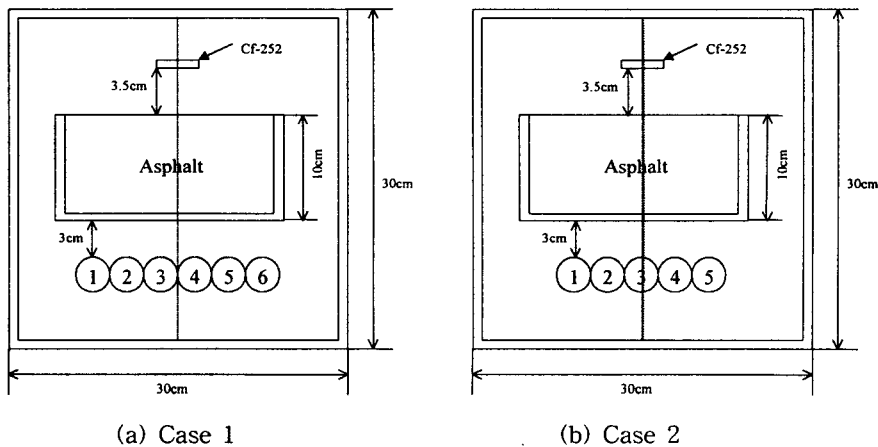


그림 1. 검출기 위치결정을 위한 Geometry

5.2 선원의 위치 선정 및 반사체 설치

낮은 강도의 방사성동위원소를 이용한 아스팔트함량 측정장비의 개발을 위해서는 측정오차를 줄이고 함량변화에 따른 계측수의 민감도를 증가시키기 위해 가능한 많은 계측수를 얻을 수 있도록 설계하는 것이 중요하다. 아스팔트혼합물과 중성자 선원과의 간격을 줄일 경우 선원으로부터 방출된 속중성자가 아스팔트와 골재의 혼합물 속으로 더 많이 입사하게 되므로 열중성자 검출기에서 검출되는 계측수도 증가하게 된다.

최초 선원과 아스팔트 혼합물의 간격을 추가적인 구조재를 설치하기 위한 여유공간을 고려하여 3.53cm로 설계하였으나 계측수를 증가시키기 위해서 최소의 공간만을 고려한 1cm로 줄인 후 MCNP 코드로 계측수를 계산하여 표 3에 나타내었다. 선원과 아스팔트 혼합물의 간격을 3.53cm에서 1cm로 줄임으로서 약 1.5배 이상의 계측수가 증가함을 알 수 있다.

표 3. 선원과 아스팔트 혼합물의 간격을 줄일 경우 아스팔트함량 변화에 따른 계측수

	5%	6%	7%
계측수 (3.5cm 간격)	1.64E+03	2.38E+03	3.05E+03
계측수 (1cm 간격)	2.38E+03	3.47E+03	4.88E+03

코드계산으로부터 얻은 6% 아스팔트함량을 갖는 혼합물에 대한 계측수는 3470개로서 계측수에 대한 표준편차(one standard deviation)를 고려하면 계측수는 3470 ± 59 의 값을 가지며, 상대오차는 1.7%로서 이를 줄이기 위해 보다 많은 계측수를 얻을 수 있도록 설계하여야 한다.

계측수를 보다 증가시키기 위해 선원의 1cm위에 폴리에틸렌(두께 : 1cm)을 설치하여 선원의 윗부분으로 방출된 속중성자들이 폴리에틸렌과의 산란반응을 통하여 아스팔트 혼합물 속으로 입사하도록 설계한 후 MCNP 코드로 계측수를 계산하여 표 4에 나타내었다. 6% 아스팔트 함량에서의 계측수는 $17,528 \pm 132$ (상대오차 : 0.76%)의 값을 갖으며, 선원과 아스팔트 혼합물의 간격을 3.53cm에서 1cm로 줄인 후 반사체를 설치할 경우 계측수가 약 7배정도 증가함을 알 수 있다.

표 4. 반사체 설치 후 함량 변화에 따른 계측수의 MCNP 코드 계산결과

	5%		6%		7%	
	계측수	상대오차	계측수	상대오차	계측수	상대오차
반사체 설치(1cm 간격)	14,764	0.013	17,528	0.012	20,627	0.011

6. 아스팔트함량 측정실험

아스팔트혼합물에 포함된 아스팔트함량 측정을 위한 실험은 ASTM D 4125(Standard Test Methods for Asphalt Content of Bituminous Mixtures by the Nuclear Method)방법에 기인하여 수행하였다.[5] 이 시험방법은 사전에 교정용 시료를 준비하여 그 값을 측정후, 구하고자 하는 시료에 대한 아스팔트 함량을 교정시료의 측정값과 비교함으로써 시료에 포함된 아스팔트 함량을 결정하게 된다.

아스팔트 함량은 아래 식 1과 같으며, 아스팔트와 혼합하게 될 골재는 체가름 시험(KS F 2502)을 통하여 골재입도를 파악한 후, 입도곡선을 이용하여 배합에 적합한 비율을 결정하게 된다.[6]

$$\text{아스팔트함량(\%)} = \frac{\text{아스팔트의 무게}}{\text{골재와 아스팔트 혼합물의 무게}} \times 100 \text{ ----- <식 1>}$$

MCNP 코드 설계를 바탕으로 제작한 아스팔트함량 측정장비의 계측수를 표 5와 표 6에 나타내었다. 표 5에서 Blank sample은 건조시킨 골재를 설계한 배합비율에 따라 혼합하여 아스팔트와 혼합하지 않고 pan에 채운 시료로서 모든 sample의 무게를 blank sample의 무게와 맞추어 제작하게 되므로 각 시료들의 밀도를 일정하게 조절할 수 있다. 표준계측값(STD)은 아스팔트함량 측정장비 안에 선원만을 놓고 측정된 값으로 표준계측값과 교정용 시료에 대한 계측수는 상대오차를 줄이기 위하여 16분간 측정하였으며, 다른 시료들에 대해서는 5분간 측정하였다.

표 5. Background, Blank sample, STD에 대한 계측수

	계측수(cpm)		
	1회	2회	Average
Background	67	73	70
Blank sample	1262	1265	1263
STD	1441	1396	1419

표 6. 교정용 시료와 시험용 시료의 계측수

아스팔트 함량		계측수(cpm)		
		1회	2회	Average
교정용 시료	4.40%	2014	1972	1993
	6.81%	2693	2662	2678
시험용 시료	5.54%	2390	2340	2365
	6.03%	2375	2435	2405

본 연구에서는 MCNP 코드 계산결과와 검증용 시료를 제작한 후 측정하여 코드 모사결과를 비교하였다. 표 7과 그림 2에서는 실험과 코드계산의 비교 결과를 나타내었다. 아래의 표 7과 그림 2에서 코드 계산값(1)은 housing의 일부 구조에 대해 모사하지 않은 값이며, 코드 계산값(2)은 housing에 대해 보다 자세히 모사한 결과로서 housing의 세부적인 모사를 통해 코드 계산 결과가 실험으로부터 얻은 결과에 보다 근접하게 됨을 알 수 있다. 실험과 MCNP 코드 모사 결과를 비교해 볼 때 두 결과는 잘 일치하고 있으며, 이를 통해 MCNP 코드 모사를 통한 아스팔트 함량 측정장비의 설계가능성을 검증할 수 있다.

표 7. 실험값과 MCNP 코드 계산값의 비교 (단위 : cpm)

	0%	4.4%	5.54%	6.03%	6.81%
실험값	1193	1922	2294	2334	2607
코드 계산값(1)	1018	1776	2094	2270	2608
코드 계산값(2)	1102	1899	2273	2418	2769

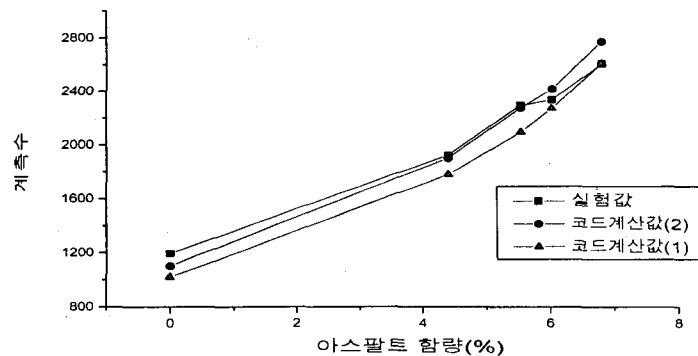


그림 2. MCNP 코드 계산결과와 실험값의 비교

7. 교정식

아스팔트함량 측정에 사용하는 방사성동위원소는 시간이 지남에 따라 붕괴함으로 그에 대한 영향을 고려하기 위하여 실험측정결과에 대한 교정식에는 계측수를 그대로 사용하지 않고 아래 식 2와 같은 계측비를 사용하며, 아스팔트함량 변화에 따른 계측비를 계산하여 표 8에 나타내었다.

$$\text{계측비} = \frac{\text{시료에 대한 계측값 (CNT)}}{\text{표준 계측값 (STD)}} \quad \text{-----} \quad \text{<식 2>}$$

표 8. 아스팔트 함량 변화에 따른 계측비 (실험결과)

	4.4%	5.54%	6.03%	6.81%
계측비	1.426	1.702	1.732	1.934

4.4%와 6.81%의 아스팔트 함량을 가진 교정용 시료의 계측비에 대해 선형보간을 하여 교정식을 얻었으며 교정식의 형태는 아래 식 3과 같다.

$$\text{아스팔트 함량 (y)} = A \times \text{계측비 (x)} + B \quad \text{-----} \quad \text{<식 3>}$$

표 8에서 4.4%와 6.81%의 교정용 시료에 대한 교정식은 $y=4.7441x-2.3649$ 이다. 이 교정식에 대하여 5.54%와 6.03%의 계측비를 대입하여 아스팔트함량을 구해보면, 각각 5.709%와 5.85%를 나타낸다. 6.03%의 실험용 시료에 대하여 계측비의 표준편차를 고려하면 1.732 ± 0.026 의 계측비를 갖으며 교정식을 이용하여 아스팔트 함량을 구하면 5.729~5.975% 범위의 값을 갖게 된다.

8. 결론

MCNP 코드를 이용한 아스팔트함량 측정장비의 설계결과를 바탕으로 장비와 시료를 제작한 후 측정하여 실험 값과 코드계산 값을 비교한 결과 두 값이 잘 일치함을 알 수 있었다. 실험결과 6.03%의 아스팔트함량을 갖는 시료에 대해 1.732 ± 0.026 (상대오차 1.5%)의 계측비를 얻었으며, 이 계측비에 대해 교정식을 이용하여 5.85%(5.729~5.975%)의 함량을 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 연구목표와 아스팔트 포장공사의 현장배합 허용오차 범위를 만족시키는 값으로서 낮은 강도의 선원을 이용한 아스팔트함량 측정장비의 MCNP 코드모사를 통한 설계 및 개발 가능성을 보여준다.

참 고 문 헌

1. J. Briesmeister, Ed., "A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, November 1993.
2. 한국도로공사, "고속도로공사 일반시방서," 한국도로공사, 1990.
3. Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," John Wiley & Sons, 1989.
4. CPN Company, "AC-2R Asphalt Content Gauge Operating Manual."
5. ASTM D 4125, "Standard Test Methods for Asphalt Content of Bituminous Mixtures by the Nuclear Method."
6. 박승범, "토목재료실험," 문운당, 1993.