

방사성동위원소 계측기를 이용한 아스팔트함량 측정실험

김도형, 이석근, 황주호
경희대학교

이광호, 옥창권, 최상준
한국도로공사

요 약

아스팔트포장에서 아스팔트함량은 도로의 내구성 및 안정도 등의 도로성질을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 아스팔트함량을 측정하는 기존의 방법은 검사시간이 많이 걸릴뿐 아니라 오차도 상당히 커서 측정결과에 대한 신뢰도가 떨어진다. 선진국에서는 아스팔트함량을 측정하기 위해 방사성동위원소(Radioisotope, 이하 RI)를 사용한 측정기를 1950년대 초부터 개발, 사용하고 있으나 국내에서는 거의 적용된 예가 없다. 이에 높은 정밀도와 정확도를 가지며 실시간 측정이 가능한 아스팔트함량측정기에 대해 우리나라에서 생산된 골재와 아스팔트를 사용하여 측정성능을 평가하였다.

1. 서론

도로포장시 주로 사용하는 아스팔트포장에서 아스팔트역청재의 함량은 아스팔트포장도로의 종류를 결정할 만큼 도로의 성질에 큰 영향을 미친다. 아스팔트포장은 골재와 아스팔트역청재를 혼합하여 이를 도로포장에 사용하는 것인데, 이때 아스팔트함량은 포장된 도로의 내구성, 안정도, 미끄럼방지도 등의 도로성질을 결정하는 요인이 된다. 아스팔트함량이 설계치보다 낮을 경우 포장의 피복상태가 좋지 않게 되고 혼합물이 쉽게 부서지는 상태가 되며, 높을 경우는 혼합물과 아스팔트역청재가 유리되는 등의 불량한 상태가 된다.[1][2][3] 따라서 아스팔트공장에서 만들어져 도로포장현장에 깔리는 아스팔트혼합물의 아스팔트함량의 검사는 잘못된 아스팔트함량을 교정할 수 있게 되어 도로포장의 부실공사를 사전에 예방할 수 있는 효과를 가져온다.

이에 따라 아스팔트포장을 하기전에 사용할 아스팔트혼합물의 아스팔트함량을 포장현장에서 측정을 하는데, 아스팔트함량을 측정할 수 있는 기존의 방법(용매추출법)은 검사시간이 많이 걸릴뿐 아니라 오차가 상당히 커서 시험결과에 대해 신뢰를 가질 수 없었다. 이에 선진국에서는 아스팔트 함량을 측정하기 위한 방사성동위원소(RI)를 사용한 측정기를 1950년대 초부터 개발하여 사용하고 있다. 이 RI 측정기는 아스팔트함량측정시 품질관리기준치의 허용오차를 만족하는 높은 정확도와 정밀도를 가지며, 실시간에 아스팔트함량을 알수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 국내에서는 거의 적용된 예가 아직 없는 형편이다. 이에 미국에서 제작된 아스팔트함량측정기(AC-2R, CPN사 제작)와 우리나라에서 생산된 골재와 아스팔트를 사용, 그 측정기의 성능을 평가하였고, 또한 보정식을 구하여 각각의 실험에서 얻은 보정상수를 비교하고, 시료온도에 따른 차이와 측정오차의 원인을 추정하였다.

2. 아스팔트함량 측정

2.1. 아스팔트

아스팔트는 천연아스팔트와 인공아스팔트로 나뉘는데 이중 인공아스팔트는 석유의 정제에서 잔유물을 처리하여 얻는다. 석유아스팔트는 아스팔트기나 혼합기 원유를 증류하여 제조하는데 흑갈색 또는 흑색으로 비중 0.88~0.98, 파라핀함유량 0~1%, 잔유탄소 3~10%, 타르성분함량 20~85% 이다. 증류방법에 의해 직유아스팔트(Straight asphalt)와 블로운아스팔트(Blown asphalt)로 나뉘는데, 직유아스팔트는 신장성, 점착성, 방수성이 풍부한 반면 연화점, 내후성이 낮고 감온비가 큰 결점이 있다. 직유아스팔트중에 훈기정제한 것은 감압정제한것보다 융점과 감온비가 낮고 신장성과 점착성이 커서 충격에 강하므로 도로포장용 아스팔트로 주로 사용하는 것이다. 아스팔트의 점도 및 유동성은 온도의 상승과 함과 점도는 감소하며 어느 정도까지는 형태가 유지되나 120℃ 이상이면 액상으로 된다. 인화점은 보통 300℃ 이하이다. 아스팔트는 가열하면 일부가 증발되면서 액상으로 된다. 300℃ 이상으로 가열하면 증유(蒸油)가 일어나며, 450℃ 이상에서 분해를 촉진하고 최후에 탄소가 남는다. 아스팔트는 여러 가지 유기용제에 용해되는데 용제의 용해력은 표면장력이 높을수록 크다. 용제로는 벤젠, 이황화탄소(CS₂), 사염화탄소(CCl₄), 석유나프타등이 있다. 아스팔트에 파라핀이 존재하면 저온에서 포화하는 원인이 되며, 고온에서는 점성이 높아져서 부착력이 감소하여 안정도를 해치게 되므로 파라핀의 함유량은 5%를 한도로 한다.[1][2][3]

아스팔트는 경도에 의해 등급이 나누어지는데, 경도는 규격화된 표준침이 관입하는 정도를 측정하는 침입도시험(조건 25℃, 100g, 5초)에 의해 결정된다. AP-3는 침입도가 85~100으로 경도가 중간이며 AP-5는 침입도가 60~70으로 경성이다. 본 실험에는 유공정유회사에서 제조한 AP-3와 AP-5를 사용하였으며 각 제품의 특성은 다음의 표(1)과 같다.[4][5]

아스팔트	비중(25℃)	침입도	연화점(℃)	인화점(℃)
AP-3 (AC85-100)	1.029	92	45.0	358
AP-5 (AC60-70)	1.032	67	47.5	356

표 1 각 아스팔트의 특성

2.2. 골재

골재는 서해안(A, 대림산업평택공장), 아산만(B), 영동(C, 영동사업소 제2공구)에서 가져온 것을 사용하였다. 각 골재는 19mm, 13mm, 8mm, 모래, 석분을 혼합하여 사용하며 이 골재들은 채분석을 통해 입도곡선을 구한 뒤, 표(2)와 같은 골재배합비를 얻는다. 이 골재배합비에 맞게 골재들을 혼합한 뒤 아스팔트와 섞어 사용한다. [1][2][3]

	서해안(A)	아산만(B)	영동(C)
19mm 골재	22%	19%	26%
13mm 골재	17%	24%	15%
8mm 골재	43%	36%	40%
모래	14%	12%	14%
석분	4%	9%	5%

표 2 골재배합비

2.3. 아스팔트 함량측정 시험방법

아스팔트함량은 아스팔트역청재와 골재의 혼합물에 대한 아스팔트역청재만의 질량비로 정의되며 수식으로 나타내면 다음의 식(1) 과 같다.[1]

$$\%AC = \frac{\text{Asphalt}}{\text{Asphalt} + \text{골재}} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

아스팔트함량을 측정하기 위한 기존의 방법으로는 용매추출법등이 있다. 이는 염화메틸렌, 트리클로에틸렌, 1,1,1-트리클로에탄 등의 '유독성' 아스팔트용제를 아스팔트혼합물에 넣은 뒤 아스팔트역청재와 골재를 분리하여 아스팔트함량을 측정하는 방법이다. 아스팔트함량에 대한 현장배합 허용오차범위는 한국도로공사의 품질관리 지침서를 보면 $\pm 0.3\%$ 로 나와 있는데, 기존의 방법들은 이 범위를 넘어서는 측정오차를 가지고 있어서 측정결과에 대한 신뢰성을 보장할수 없다.[6] 또한 유독성용제를 사용함으로써 오염물질을 배출하는등 환경에도 좋지 않은 영향을 끼친다.

이에 반해 RI 계측기를 사용한 아스팔트함량 측정은 기존의 방법에 비해 높은 정확도와 정밀도를 보장하고, 환경에도 나쁜영향을 끼치지 않으며, 실시간 계측등 시간적, 경제적인 잇점이 있다.[8][9] 본 실험에서는 아스팔트역청재와 골재의 양을 실험자가 적절하게 혼합함으로써, 임의의 아스팔트함량을 가지는 시료를 제작하였다. 이렇게 아스팔트함량을 알고있는 시료를 사용하여, RI계측기로 측정한 값과 실제 아스팔트함량을 비교하였다.

3. RI계측기를 사용한 아스팔트함량 측정

3.1. RI를 이용한 계측기의 측정원리

속중성자 선원으로부터 방출된 속중성자는 아스팔트혼합물(아스팔트역청재+골재)을 통과하면서 혼합물의 구성원소원자핵과 산란및 흡수반응을 한다. 이때 속중성자는 원자핵들과의 탄성충돌에 의해 운동에너지를 잃게 되는데, 몇번의 충돌후에 주위원자핵들과 열적평형상태를 이루게 되어 평균에너지 0.0253eV, 평균속도 2200m/sec인 열중성자가 된다. 한번의 충돌로 인해 중성자가 잃게되는 에너지는 충돌원자핵의 질량에 반비례하는데, 원자핵의 질량이 가장 작은 수소원자핵과 충돌을 할 때 가장 많은 에너지를 잃게 된다.[7]

아스팔트혼합물 중 골재는 대부분 규소(Si)와 산소(O)로, 아스팔트는 대부분 탄소(C)와 수소(H)로 구성되어 있다. 따라서 아스팔트혼합물내의 수소함유량은 대부분 아스팔트역청재의 증가에 기인하게 된다. 수소원자핵 이외의 다른 원소들은 중성자의 감속에는 큰 영향을 미치지 못하지만 중성자의 진행방향을 바꾸고 흡수에서 중성자가 빠져나가게 하는 원인이 된다. 아스팔트함량의 증가는 수소함량의 증가로 이어지며, 이는 속중성자가 열중성자화되는 경향이 커짐을 나타낸다. 여기에 He-3 열중성자 계측기 등을 사용, 열중성자를 계측하여 아스팔트함량에 따른 열중성자 계측률의 변화경향을 수식으로 나타내므로써 아스팔트함량을 알수있게 된다.[8][9]

3.2. 보정상수

보정상수는 RI계기의 계측율과 아스팔트혼합시료의 아스팔트함량과의 관계를 나타내는 보정함수에 사용되는 상수이다. 아스팔트함량측정기에서의 보정함수는 직선의 함수로 나타나는데, 이는 아스팔트함량의 증가에 따라 열중성자속이 거의 선형에 가깝게 증가함으로 인해서 나타나는 현상이다. 이 현상에 근거하여 보정함수를 유추하여 그에 따른 보정상수를 구한다. 보정상수는 다음의 식(2)에서 구한다. %AC는 구하려는 아스팔트함량을, 보정상수 A는 보정식에서 기울기를, 보정상수 B는 절편을 나타낸다. CNT는 시료를 계측한 값(CPM)을, STD는 시료없이 계측한 값(Background, CPM)을 나타낸다. 여기서 시간이 지남에 따라 RI의 세기가 약해지는 변화가 있고, 또한 주위환경의 변화에 따른 계측률의 차이가 생기므로 이를 보정하여 객관성을 유지하기 위해 CNT/STD(계측율비)를 사용한다. [10][11][12]

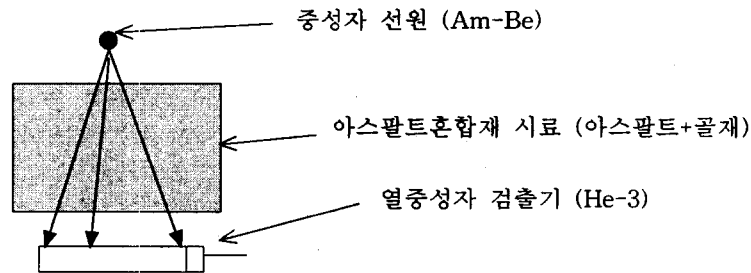
$$\%AC_{cal} = A \times \frac{CNT}{STD} + B \dots\dots\dots(2)$$

3.3. 계측기를 사용한 아스팔트함량 측정실험

본 실험은 ASTM(American Society for Testing and Materials) D-4125에 맞추어 실행하였다.[10] 현재 우리나라에서 주로 사용하는 아스팔트의 함량은 5.8%이다. 이를 기준으로 하여 본 실험은 아스팔트함량을 5.0%부터 7.0%까지 0.2%단위로 증가시키면서 시행하였으며, 실험실내부는 항상 온도 27%, 습도 55%를 유지하였다. 실험에 사용한 골재와 아스팔트는 각각 3가지와 2가지였다. 골재는 A(서해안), B(아산만), C(영동)의 세종류로, 아스팔트는 1(AP3), 2(AP5)의 두종류로 분류하였고, 실험은 각 골재와 아스팔트를 조합하여 총 6가지(A1,A2,B1,B2,C1,C2)의 시료종류에 대해 시행하였다. 각 시료는 크기 230mm×180mm×100mm, 두께 0.8mm의 스텐레스강재질의 샘플팬(sample pan)에 무게가 7kg정도 되도록 담아서 측정하였다.

실험은 우선 5.0%와 7.0%의 아스팔트함량을 갖는 두개의 아스팔트혼합시료를 측정한다. 이때 혼합시료의 온도는 혼합당시 140℃정도였고, 측정은 120℃정도가 되었을 때 실행하였다. 두 시료의 알고있는 아스팔트함량값과 계측후 얻은 계측율과의 관계를 토대로 보정합수와 보정상수(A,B)를 구한다. 그 다음 시료의 아스팔트함량을 5.0%에서 0.2%씩 증가를 시키면서 측정을 하여 계측율에 따른 아스팔트함량을 구한다.

각 시료의 계측율은 4분간씩 3회를 실시하여 그 평균값을 취하였다. 그 다음 보정합수를 통해 계측율로 구한 아스팔트함량값과 이미 알고 있는 아스팔트함량을 비교하고 그 차이를 분석하였다. 또한 시료의 온도에 따른 계측율의 변화를 보기위해 시료중 한가지를 택한뒤, 시료를 120℃에서 25℃까지 자연냉각시키면서 계측율의 변화를 추적하였다. 그림(1)은 아스팔트함량 측정기의 개략적인 그림이다.



< 그림 1 아스팔트함량 측정기 >

4. 결과 및 고찰

4.1. 실제아스팔트함량과 계측아스팔트함량

세가지 종류의 골재(A,B,C)와 두가지 종류의 아스팔트(1,2)를 조합하여 총 6가지의 시료종류에 대해 실험을 하였다. 각 골재와 아스팔트에 대한 실험결과를 다음의 그래프로 나타내었다.(그림(2)~(7)) 아래 그림들에서 가로축은 각 시료의 아스팔트함량을 나타내고, 세로축은 계측기로 측정된 아스팔트함량값을 나타낸다.

그림(2)와 그림(3)은 서해안골재에 아스팔트의 종류를 달리하여 측정된 것이다. 가로축은 각 샘플에 해당하는 아스팔트함량을 나타내며, 세로축은 측정된 아스팔트함량을 나타낸다. 사각형점의 직선은 각샘플의 실제 아스팔트함량을 이은 직선이고, 원형점의 직선은 RI계측기로 측정된 아스팔트함량의 측정값을 이은 직선이다. 그림(2)는 서해안골재-AP3의 조합으로 최대오차 0.16%AC이며 평균 0.033%AC의 오차를 나타낸다. 그림(3)은 서해안골재-AP5의 조합으로 최대 오차 0.13%AC이며, 평균 0.015%AC의 오차를 보인다.

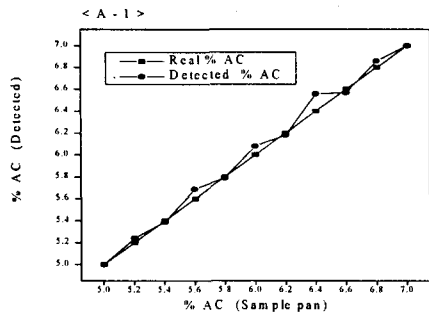


그림 2 서해안골재 - AP3

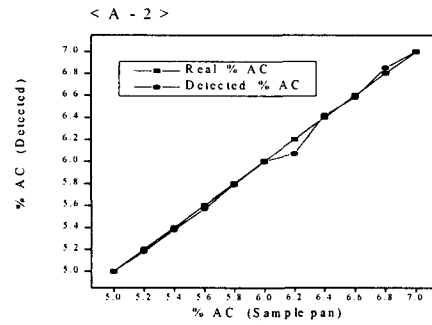


그림 3 서해안골재 - AP5

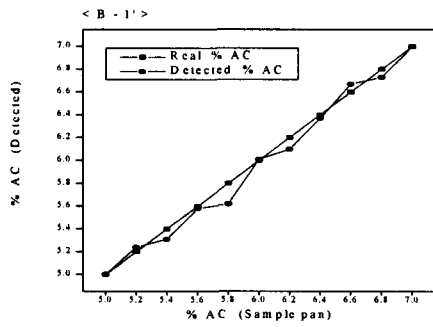


그림 4 아산만골재 - AP3

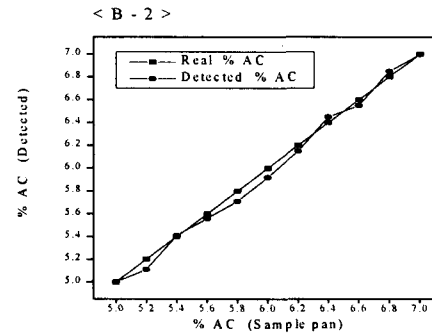


그림 5 아산만골재 - AP5

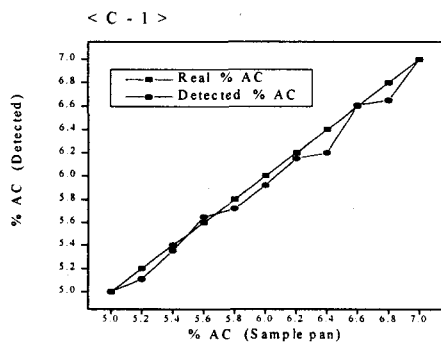


그림 6 영동골재 - AP3

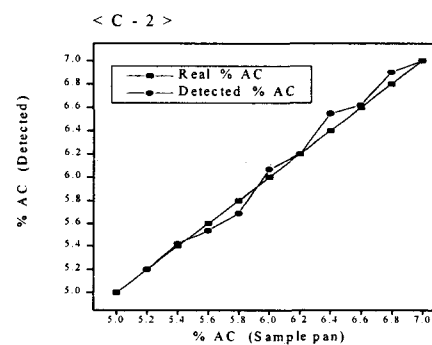


그림 7 영동골재 - AP5

그림(4)와 (5)는 아산만골재에 아스팔트종류를 바꾸어서 측정한 것이다. 그림(4)는 아산만골재-AP3의 조합으로 최대오차 0.18%AC, 평균오차 0.026%AC를 나타낸다. 그림(5)는 아산만골재-AP5의 조합으로 최대오차 0.09%AC, 평균오차 0.026%AC를 보인다.

그림(6)과 그림(7)은 영동골재에 아스팔트의 종류를 바꾸어서 측정한 것이다. 그림(6)은 영동골재-AP3의 조합으로 최대오차 0.20%AC, 평균오차 0.058%AC를 보인다. 그림(7)은 영동골재-AP5의 조합으로 최대오차 0.15%AC, 평균오차 0.017%AC를 보인다.

본 실험에서 RI계기로 측정한 아스팔트함량값의 오차는 표(3)과 같다. 6가지의 실험결과 아스팔트함량의 평균절대오차가 최대 0.06%AC 이하이고, 표준편차는 최대 0.08 이하임을 알 수 있다.

시료	오차평균(%AC)	최대오차(%AC)	표준편차
A-1	0.03273	0.16	0.05643
A-2	-0.01455	-0.13	0.04229
B-1	-0.02550	-0.18	0.07580
B-2	-0.02636	-0.09	0.04922
C-1	-0.05818	-0.20	0.06991
C-2	0.01727	0.15	0.06784

표 3 아스팔트함량 측정의 오차

4.2. 보정상수

본 실험에서 구한 각 시료에 따른 보정상수값이 표(4)에 있다. 이 보정상수들은 앞의 보정식(식(2))에 적용되어져서 계측율에 해당하는 아스팔트함량값을 구할 수 있게 된다.

시료	보정번호	보정상수 A	보정상수 B	STD
A-1	12	6.0687	-4.9025	9123
A-2	41	5.8984	-4.8390	8650
B-1	23	5.2560	-3.0712	8572
B-2	51	5.9494	-4.0001	8603
C-1	62	5.8543	-3.9806	8787
C-2	61	6.2005	-4.4446	8743

표 4 각 시료에 대한 보정상수

4.3. 시료온도에 따른 계측값의 변화

아스팔트혼합시료의 온도에 따른 계측값의 변화를 측정해 보았다. 6가지 시료중 임의로 아산만-AP5의 시료를 골라서 혼합직후 약 120℃의 온도에서 측정을 시작, 자연냉각시키면서 온도가 약 10℃씩 하강함에 따라 아스팔트함량을 측정하였다. 온도가 하강함에 따라 측정된 아스팔트함량값의 변화를 보면 그림(8),(9)와 같다. 그림(8)과 (9)에서 원형점의 직선은 각각 실제아스팔트함량값이고, 사각형점의 선은 측정한 아스팔트함량값을 나타낸다. 그림(8)은 B-2, 5.8%AC 시료에서 온도가 약 120℃~75℃에서는 큰 변화가 없었으나 약 75℃이하의 온도가 되면서 측정된 아스팔트함량값은 눈에 띄게 증가하여 상온인 25℃에서는 실제 아스팔트함량보다 약 0.2%나 더 많은 것으로 계측되었다. 그림(9)는 B-1, 6.0%AC 시료의 온도에 따른 계측값의 변화를 보인 것이다. 이 경우는 온도가 60℃이하로 떨어지면 계측한 %AC값이 0.1%AC이상 증가하면서 계측율이

계속 증가하는 경향을 보인다.

앞의 원인을 두가지로 추정할수 있는데 첫 번째 추정은 다음과 같다. 그림(10)은 B골재만을, 그림(11)은 AP3 아스팔트만을 따로 온도에 따라 측정한 값이다. 그림(11)에서 아스팔트의 온도가 감소함에 따라 계측율은 얼마간 증가를 보이다가 안정이 되는 것으로 보이지만, 그림(10)에서 골재만을 측정했을 경우에는 온도가 70℃이하로 되면서 급격한 계측율의 증가를 보인다. 따라서 아스팔트혼합물의 온도에 따른 계측율의 증가는 골재에 의한 영향이 크다고 볼수 있다. 두 번째 추정으로는 계측기와 시료사이의 공간에서 공기중 수분이 온도가 하강함에 따라 응축되어 수분의 수밀도가 증가하여 계측율의 증가에 영향을 주었다고 볼수 있는데, 이 추론의 검증을 위해 추가적인 실험이나, MCNP코드 등을 사용한 시뮬레이션등이 행해져야 할것으로 본다.

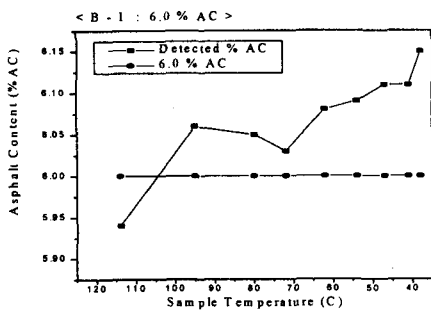


그림 8 시료온도에 따른 측정값의 변화 (시료 B-1, 6.0 % AC)

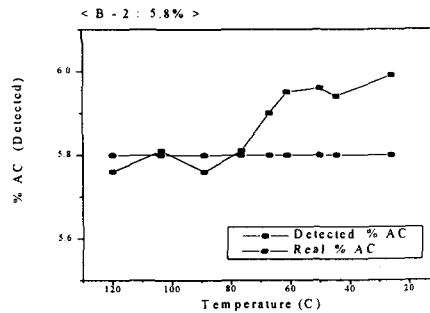


그림 9 시료온도에 따른 측정값의 변화 (시료 B-2, 5.8 %AC)

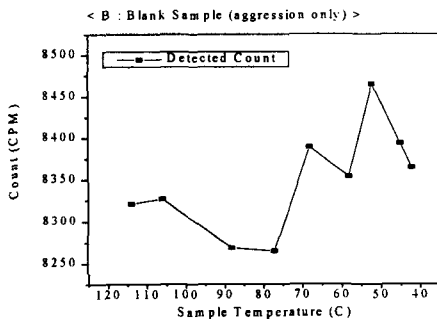


그림 10 시료온도에 따른 계측값의 변화 (골재만 있을 경우)

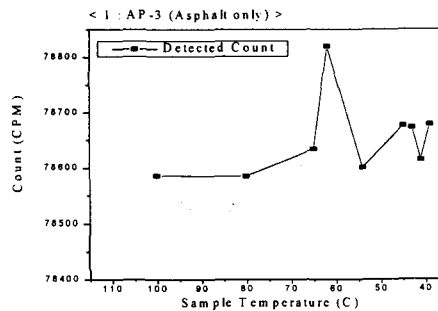


그림 11 시료온도에 따른 계측값의 변화 (아스팔트만 있을 경우)

5. 결론

실험시의 날씨, 온도, 습도, 골재종류, 아스팔트의 종류 등의 변화에도 불구하고 실제 아스팔트

함량과 RI계기로 측정해서 구한 아스팔트함량값은 4분간 계측시 평균적으로 $\pm 0.06\%AC$ 의 범위 내에서 거의 일치하였으며, 보정곡선의 개형도 이론적인 예측과 비슷하게 선형에 가까운 형태로 나타났다. 또한 시료중 최대오차는 $0.2\%AC$ 로서 품질관리지침서에 따른 현장배합허용오차범위인 $\pm 0.3\%AC$ 보다 작은 값을 알 수 있다. 따라서 이 실험으로 방사성동위원소를 이용한 아스팔트함량의 측정은 우리나라에서 생산된 골재와 아스팔트에 적용하여도 무리가 없음을 추정할 수 있다. 다만 이 측정은 아스팔트혼합물내의 아스팔트함량(%)을 직접 구하는 것이 아니라, 실제 아스팔트혼합물내에 있는 아스팔트역청제의 구성성분중의 하나인 수소의 양에 의존하는 것이다. 따라서 아스팔트의 양이나 골재의 양을 잘못 계량하거나, 또는 아스팔트함량은 목표하는 값과 같을지라도 시료의 총질량이 다르면 계측하여 구한 아스팔트함량값은 틀리게 된다. 또한 골재를 충분히 건조시키지 않아서 골재가 수분을 많이 함유하거나, 계측에 큰 영향을 미치는 원소들을 함유하였을 경우 이에 대한 보정이 있어야 할 것이다.

아스팔트혼합물의 온도에 따른 계측을 변화의 경우, 온도가 $130^{\circ}C \sim 25^{\circ}C$ 일 때 아스팔트함량 측정값이 변화더라도 그 범위가 $0.2\%AC$ 를 넘지 않았다. 따라서 시료온도에 따른 아스팔트함량 측정값의 변동은 허용오차범위에 있으며, 실제로 아스팔트포장시는 아스팔트혼합물의 온도가 $120^{\circ}C$ 이상 되므로 약 $70^{\circ}C$ 이하의 온도에서 생기는 계측율의 급격한 증가는 실제 현장에서 아스팔트함량 측정용으로 사용할 때는 크게 고려할 필요가 없을 것이다.

* 감사의 글

- 본 실험에 도움을 주신 한국도로공사 품질관리부 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 柳又秀, 朴雲龍, “土木材料學”, 盤雪出版社, 1994
2. Paul H. Wright, Radnor J. Paquette, “Highway Engineering”, John Wiley & Sons, Inc., p411-469, p576-617, 1987
3. Harmer E. Davis, George Earl Troxell, George F.W. Hauck, “The testing of engineering materials”, McGraw-Hill Book Company, p351-390, 1982
4. 具駙宅, “아스팔트鋪裝道の 設計 및 施工法”, 盤雪出版社, 1972
5. 朴承範, “土木材料實驗”, 文運堂, 1993
6. 韓國道路公社, “工事現場 品質管理實務”, 1992
7. John.R.Lamarsh, “Introduction to Nuclear Reactor Theory”, Addison-Wesley publishing, 1966
8. Troxler electronic laboratories, Inc., “Asphalt content gauge 3241-B Instruction manual”
9. Public Roads vol. 58, No. 3, “Featuring developments in federal highway policy, programs, research and technology”, Winter 1995
10. ASTM D4125, “Standard test method for Asphalt content of bituminous mixtures by the nuclear method”
11. CPN company, “AC-2R Asphalt content gauge operating manual”
12. Steven E. Niederhauser, “Evaluation of the Troxler 3241-B Asphalt content gauge”, Utah department of transportation materials & research section bituminous mix design laboratory 6.