

침착활성탄 성능검사 방법의 불확도 추정

박경록, 양호연, 황태원

한국수력원자력(주) 원자력발전기술원, 대전광역시 유성구 장동 25-1

krpark@khnp.co.kr

1. 서론

침착활성탄 성능검사 장치는 원자력발전소 공기정화계통에 사용하고 있는 침착활성탄의 방사성요오드 제거 성능을 시험하는 장치이다. 성능검사는 ASTM D 3803-91에 따라 온도, 습도, 압력조건을 유지시킨 후 방사성요오드 추적자를 기체형태로 흘려보내 침착활성탄이 장착되어 있는 반응기를 통과시키고 반응기내에 있는 침착활성탄의 방사성요오드 방사능량을 분석하여 성능을 평가하게 된다. 성능평가에 사용한 방사능측정기는 NaI 섬광검출기를 사용하였다. 불확도 산정은 장비, 환경, 사람에 의해 발생 가능한 불확도를 산정하는 것이며 본 논문에서는 방사능측정, 재현성, 반복성, 시료부피변화 등 불확도 요인을 분석하고 이에 대한 확장불확도를 추정하였다. 추정된 확장불확도는 신뢰수준 95%에서 약 ±1.02%로 추정되었다.

2. 재료 및 방법

침착활성탄 성능검사는 검사전 시료의 BKG 방사능을 측정하고 상대습도 95% 이상에서 전처리운전 16시간, 평형운전 2시간, 흡착운전 1시간, 탈착운전 1시간의 과정을 거친 후 시험시료를 꺼내 감마핵종 방사능측정을 한다. ASTM 3803-91에 따라 Test Bed의 흡착효율 및 투과율을 계산한다. 이런 일련의 과정에서 발생할 수 있는 불확도를 산출하게 되는데 불확도 산출절차는 우선 수학적 모델을 구축하고 불확도 요인분석, 표준불확도 산출, 합성표준불확도 산출, 유효자유도 산출, 포함인자 산출, 확장불확도 추정, 불확도 총괄표 작성 등의 순으로 계산하게 된다.

불확도 산출을 위한 수학적 모델은 다음 식-1과 같다.

$$\text{효율}(E) = \frac{a}{(a + b + c)} \cdot \gamma_x \times 100 (\%) \text{-----}(\text{식-1})$$

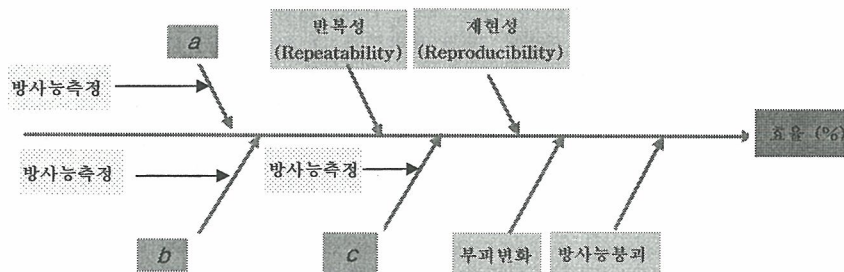
a: Test Bed의 ¹³¹I 방사능계수율(counts/min)

b: Backup Bed #1의 ¹³¹I 방사능계수율(counts/min)

c: Backup Bed #2의 ¹³¹I 방사능계수율(counts/min)

γ_x: 방사능붕괴, 시료부피변화, 반복성, 재현성에 대한 불확도

불확도 요인에 대한 특성분석은 Fish bone 다이어그램을 이용하였다.



불확도 요인으로는 방사능측정에 대한 측정불확도와 시료부피변화에 대한 불확도, 시험자의 측정 반복성, 시험의 재현성 등이 기여하는 불확도를 고려하였다.

측정에 대한 불확도는 Test Bed, Backup Bed #1, Backup Bed #2의 측정 불확도를 합산하였다. 측정에 대한 합성표준불확도는 상기 식-1의 수학적 모델을 편미분하여 감응계수를 구하고 각각 구해진 감응계

수를 불확도 합성에 대한 일반해에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$u_E = 100 \frac{\{[(b+c)^2(S_a)^2] + a^2(S_b)^2 + (S_c)^2\}^{0.5}}{(a+b+c)^2} \text{-----(식-2)}$$

상기 식은 ASTM D 3803-91 식 A3.3의 표준편차 합성식과 같은 결과임을 알 수 있다.

시료량 변화에 대한 상대표준불확도는 시험자의 시료 정량화 변화가 측정결과에 미치는 불확도를 산정하였으며 시료의 부피를 표준부피 100 mL에서 상하로 최대 ± 1 mL씩 변화를 주어 6개의 시료를 동일 조건에서 반복 측정된 결과로 산출하였다. 방사능붕괴에 의한 상대표준불확도는 B형⁽²⁾ 평가로 NNDC(National Nuclear Data Center)핵종표에 의해 산출되었으며 반복측정(Repeatability)에 의한 상대표준불확도는 A형⁽¹⁾ 평가로서 방사성요오드 방사능을 5회 측정된 결과값을 가지고 추정되었다. 재현성(Reproducibility)에 의한 상대표준불확도는 ASTM D 3803-91(2004)의 15.1.2 Reproducibility 투과율 1%에서의 상대표준불확도를 적용하였다.

3. 결과 및 논의

각 요인별 불확도를 요약하면 다음 표와 같다.

불확도 요인	측정값	자유도	분포형태	표준불확도 $u(x_i)$	상대표준 불확도
방사능측정 제거효율	99.87 %	∞	포아송	0.008 %	0.008 %
방사능붕괴	8.03 d	∞	정규분포	0.0006 d	0.01 %
시료부피변화		5	사각형	0.03 %	0.03 %
반복성	15941.54 counts	4	정규분포	52.75 cpm	0.33 %
재현성	-	∞	정규분포	-	0.39 %
상대합성표준불확도	0.51 %	신뢰수준	95%	확장불확도(U)	1.02 %
측정결과	99.87 %	포함인자(k)	2	유효자유도(ν_{eff})	22.32
결 과 표 현	(99.87 ± 1.02) % (신뢰수준 약 95 %, k = 2)				

요오드방사능 측정 제거효율에 대한 불확도는 Test, Backup #1, Backup #2 Bed의 방사계수 a, b, c를 가지고 침착활성탄의 요오드방사능 제거효율(E)을 식-1과 같이 계산하며 표준불확도는 식-2에 따라 계산한다. 제거효율은 99.87%, 상대표준불확도는 표준불확도를 측정값으로 나눈 것으로 0.008%로 추정되었다. 방사능 붕괴 상대표준불확도는 I-131(활성탄)의 측정시간에 따른 방사능 붕괴 보정인자의 불확도로 NNDC 핵종표에 의거 0.0006 day 을 적용하여 0.01%로 추정하였다. 시료부피변화에 대한 상대표준 불확도는 부피변화를 준 6개의 시료를 측정하여 0.03%로 추정하였으며 반복성 및 재현성에 대한 불확도는 각각 0.33 % 및 0.39 %로 계산되었다. 따라서 상대합성표준불확도는 0.51 % 였으며 확장불확도는 신뢰수준 95%, 포함인자 k=2에서 1.02 % 로 추정되었다.

4. 결론

침착활성탄 성능검사에 대한 불확도 요인 중 가장 크게 나타난 것은 B형 평가항목인 ASTM 3803에 수록된 재현성으로 나타났으며 측정의 반복성에 대한 불확도가 그 다음 큰 불확도요인으로 나타났다. 이것은 측정시료의 침착활성탄내 방사능 분포 불균일성에 기인하여 나타난 것으로 판단되며 같은 시료를 측정해도 시료의 취급과정에서 측정시료의 재배치에 의한 방사능계수치 차이가 발생 가능함을 간접적으로 알 수 있다. 이를 최소화하기 위해서는 시료취급자의 세심한 주의가 요구된다. 침착활성탄의 성능평가의 주요부분인 제거효율에 대한 측정불확도는 0.008 % 가장 적게 나타났으며 이는 방사능측정에 대한 신뢰도가 0.01% 미만으로 신뢰성이 있음을 입증하고 있다.

참고문헌

1. 기술기준원 고시 제 2007-134호(2007.4.9), "측정결과의 불확도추정 및 표현을 위한 지침"
2. ASTM D 3803-91(1994) "Standard Test Method for Nuclear-Grade Activated Carbon"

주 1) A형평가 : 측정값에 의한 통계적 평가

2) B형평가 : 실 측정이 아닌 다른 정보를 이용하여 평가