

사용후핵연료 운반용기에 대한 누설 성능검사

손영준, 권형문, 전용범, 민덕기, 이형권, 김길수, 권인찬
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 nyzson@kaeri.re.kr

1. 서론

원자력연구원의 조사후연료시험시설에서 운용하고 있는 PWR 사용후핵연료 운반용기인 KSC-1은 사용 재인가를 위한 누설 성능 검사를 수행한다. 본 연구에서는 헬륨누설검출기를 이용 헬륨이 허용누설을 값을 넘는지를 점검하는 시험으로 격납경계에 대한 기밀유지 여부를 확인하기 위해 수행하여 누설 성능 검사의 일환으로 수행한 결과를 평가 하였다.

2. 시험방법

누설시험은 운반용기의 누설에 대한 성능을 점검하기 위한 시험으로 KSC-1 내부에 헬륨을 과압하여 충전한 다음 헬륨이 허용누설을 값을 넘는지를 점검하여 누설 성능을 확인하였다. 시험을 위해 헬륨 리크 디텍터(ASM 180T) 검출기가 사용되었다.

3. 운반용기 누설 평가

가. 운반용기 내의 방사능 밀도 계산

운반용기 내의 방사능 밀도는 가압경수로 핵연료집합체의 최대 Co-60 핵종의 농도인 $140\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 을 적용하여 계산하였다. 후자는 핵연료집합체에 침전되어 있는 crud가 방사화된 것이다. 다음 식(1)은 방사능 농도 계산식이다.

$$C_n = C_c + C_i + C_{FC} + C_f \quad (1)$$

C_n : 운반용기 내부의 방사능 농도(Ci/cm^3), C_i : 핵연료 내부에서 생성된 뒤, 운반용기 내부로 방출된 휘발성 핵종의 방사능 농도, C_c : 운반용기 내부로 떨어져나간 침전물의 방사능 농도, C_{FC} : 운반용기 내부로 방출된 핵분열기체의 방사능 농도, C_f : 피복관 파손으로 방출된 핵연료 소결체 분말(fines)의 방사능 농도

나. 누설 제한값

각 핵종에 대한 허용방사능량인 A_2 값은 <과학기술부고시 제2001-23호 별표 1>에 기술되어 있으며, 혼합 핵종에 대한 A_2 값은 다음과 같다.

핵연료집합체의 정상 운반시, 누설 제한값은 $10^6 A_2(\text{Ci}/\text{hr})$ 이다.

또한 감마선만을 방출하는 핵종인 Nb-95m의 경우는 <과학기술부고시 제2001-23호>에서 제시한 A_2 값인 5.41 Ci를 사용하였다.

다. 헬륨의 허용누설을 계산

허용누설율은 누설제한값과 방사능 밀도의 비로 나타내며, 다음 식(2)와 같다.

$$L = \frac{R_n}{C_n} \quad (2) \quad R_n: \text{누설제한값}(\text{Ci}/\text{s}) \quad C_n: \text{운반용기내 방사능밀도}(\text{Ci}/\text{cm}^3)$$

헬륨 시험 누설율로 환산하기 위해서는 ANSI N14.5에서 기술하고 있는 leak hole diameter를 계산해야 한다. 다음 식은 leak hole diameter를 평가하기 위한 식3과 같다.

$$L = (F_c + F_m)(P_u - P_d) \quad (3)$$

F_c : 단위 압력당 coefficient of continuum flow conductance, $\text{cm}^3/\text{atm}\cdot\text{s}$

F_m : 단위 압력당 coefficient of free molecular flow conductance, $\text{cm}^3/\text{atm}\cdot\text{s}$

P_u : Upstream pressure, P_d : Downstream pressure = 1 atm

위 식을 사용하여 leak hole diameter를 계산하고 cavity 내부를 헬륨으로 채워져 있다고 가정하여 헬륨 시험누설율을 환산하였다.

라. KSC-1 운반용기 설계값 적용

KSC-1 운반용기의 설계치는 KSC-1 안전성분석보고서의 설계값을 적용하고 KSC-1 안전성분석보고서에 있는 방사능 핵종을 평가하기 위해 A_2 값 계산과 수송용기 내 방사능 밀도 계산을 수행하였다. 두 값을 이용하여 air 상태일 때의 허용누설율을 구하면 $2.0446 \times 10^3 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{sec}$ 이다. 헬륨에 대한 허용누설율로 환산하려면 hole diameter를 계산해야 한다. 계산식은 hole diameter값이 변수인 4차 방정식으로 포트란 코드로 작성한 증분탐색법으로 초기값을 정한 뒤, 폐구간법의 하나인 False Position Method를 이용하여 값을 구하였다[2]. Hole diameter값은 $4.1965 \times 10^{-3} \text{ cm}$ 이며, 이 값을 적용한 헬륨 허용누설율은 $1.8124 \times 10^3 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{sec}$ 이며, 표1과 같다.

표 1. KSC-1 허용누설율 계산값

A_2	3.39×10 ³	
누설제한값(R _n)	9.43×10 ⁻⁸ Ci/s	
방사능밀도(C _n)	4.61×10 ⁻⁵ Ci/cm ³	
Air(Normal Operation) Helium(Reference)		
a(O-ring dia.)	46.5 cm	a(O-ring dia.) 46.5 cm
Viscosity	0.0178 cP	Viscosity 0.0198 cP
D(hole diameter)	4.1965×10 ⁻³ cm	D(hole diameter) 4.1965×10 ⁻³ cm
Temperature	128.5 °C	Temperature 25 °C
Upstream P.	3.0971 atm	Upstream P. 3.0971 atm
Downstream P.	1 atm	Downstream P. 1 atm
Molecular weight	29 g/mole	Molecular weight 4 g/mole
F _c	9.3299×10 ⁻⁴	F _c 8.3875×10 ⁻⁴
F _m	1.0998×10 ⁻⁵	F _m 2.5313×10 ⁻⁵
Maximum allowable		
leakage rate	2.0446×10 ³ atm·cm ³ /sec	leakagerate 1.8124×10 ³ atm·cm ³ /sec

표 2. KSC-1 차폐검사 결과보고서

검사보고서(Inspection Record)			검사일자	2004. 3. 11.
			검사장소	조사후시설
운반용기 명칭	KSC-1 운반용기	검사명	방사선차폐 성능검사	
조사감마선원	F02 사용후 핵연료 집합체	검사 기기	서베이미터	
측정장비	성격서번호	교정일자		
감마서베이미터	03-K0398	2003/9/19		
중성자선량	04-K0012	2004/1/15		
담당계				
검사부위(감마)	측정결과 (mR/hr)	배경선량 (mR/hr)	계산결과 (mR/hr)	
1. 외부뚜껑	0.04	0.04	0.0034	
2. 상부면	0.34	0.35	-	
3. 중앙부	0.35	0.20	0.173	
4. 바닥면 중앙	0.21	0.20	0.0194	
검사부위 (중성자)	측정결과 (mR/hr)	배경선량 (mR/hr)	계산결과 (mR/hr)	
1. 중앙부	N/D	0.03	0.049	
검사 결과			■ 만족 □ 불만족	

4. 검사결과 및 검토

KSC-1 운반용기의 최대사용압력인 3.2 kg/cm² 압력으로 내부 cavity를 헬륨으로 가압하고 헬륨검출장치로 배수구, 배기구 및 내부뚜껑을 검사한 결과, 내부뚜껑과 배수구에서는 헬륨누설이 검출되지 않았고, 배기구부에서는 헬륨허용누설율 1.8124×10³ atm·cm³/sec보다 낮은 8.2×10⁴ atm·cm³/sec의 헬륨누설율이 측정되었다. KSC-1 운반용기 격납용기의 기밀여부에 대한 검사는 합격인 것으로 판명되었다. 표 2는 누설시험 결과보고서이다

참고문헌

[1] KAERI/TR-77/85, KSC-1 안전성분석보고서, 한국에너지연구소, 1985
 [2] Ward Cheney, David Kincaid, Numerical Mathematics and Computing 4th edition, Brooks/Cole (1999)(1) B.L. Broadhead, M.B. Emmett, "QADS: A Multidimensional Point-Kernel Analysis Module", ORNL/NuREG/CSD-2/V1/R6 (1998)