

KSC-1 수송용기 격납평가

방경식, 이주찬, 서중석, 민덕기, 서기석
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
nksbang@kaeri.re.kr

1. 서 론

사용후핵연료를 안전하게 운반하기 위한 운반용기는 교육과학기술부고시 제2008-69호 및 IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1 등에서 규정하고 있는 조건들에 만족하여야 한다[1~2]. 이들 규정들에서는 B형 운반용기는 두 개의 격납경계를 가져야 한다고 규정하고 있다. 따라서, 원자력 발전소에서 방출되는 사용후핵연료 1다발을 원자력연구원으로 운반하기 위한 KSC-1 수송용기에 대해 NUREG/CR-6487에서 규정하고 있는 격납 해석방법에 따라 허용 누설률을 산출하여 격납평가를 수행하였다[3].

2. 정상조건에서의 격납

2.1 격납경계 설계기준

KSC-1 수송용기에 적재되어 운반되는 운반물로는 14×14 WH STD 1 Ass'y, 16×16 WH STD 1 Ass'y, 17×17 WH STD 1 Ass'y, 14×14 KNF OFA 1 Ass'y, 16×16 KNF SFA 1 Ass'y, 17×17 KNF V5H 1 Ass'y, 16ACCE7 12 fuel rods, 17ACE7 12 fuel rods, 17RFA fuel rods Guardian 12 fuel rods 및 PLUS7 12 fuel rods가 있으며, 이들 핵연료를 운반할 경우에 계산된 내부 cavity 온도 128.5 °C 및 내부압력 3.1 atm을 격납경계 설계기준으로 설정하였다.

2.2 허용누설률

방사능량은 전산코드 ORIGEN-2를 사용하여 계산을 수행하였으며, 격납평가는 총 방사능량이 5.25×10^4 TBq(1.42×10^6 Ci)로 가장 높은 KNF-V5H 사용후핵연료 1 Ass'y를 KSC-1 수송용기에 운반하는 경우에 대하여 수행하였다.

허용 방출률을 계산하기 위해서는 방사성 핵종의 종류에 따라 방출되는 분량을 적용하여 방출 제한치인 A_2 값을 구해야 하며, 방사성 동위원소 핵종의 방출 제한치인 A_2 value가 동일한 동위원소는 가장 큰 값을 갖는 방사성 동위원소를 대표

로 취하여 합산 후 처리하였다.

정상조건에 대한 방사성 동위원소 핵종의 방출 제한치인 등가 A_{2eq} 값은 아래 식(1)에 의해 2.41 TBq(6.50×10^1 Ci)로 계산되었으며,

$$A_{2eq} = \frac{1}{\sum F_i/A_{2i}} = 2.41 \text{ TBq} \dots\dots\dots (1)$$

방사능의 허용 방출률(R_N)은 식 (2)에 의해 6.70×10^{-10} TBq(1.81×10^{-8} Ci/s)로 계산되었다.

$$R_N = A_{2eq} \times 10^{-6} \times \frac{1}{3600} \text{ TBq/s} \dots\dots\dots (2)$$

허용 누설률은 단위 시간당 격납 경계로부터 누설되는 유체의 허용 체적이므로 단위 체적 당 방사능 농도로부터 결정된다.

KSC-1 수송용기의 cavity 체적은 $445,259 \text{ cm}^3$, 핵연료 1 Ass'y의 체적은 $76,645 \text{ cm}^3$, basket의 체적은 $89,906 \text{ cm}^3$ 이므로 자유체적(V)은 $278,708 \text{ cm}^3$ 이다. 따라서, 단위체적 당 방사능 농도(C_N)은 식 (3)로부터 $2.59 \times 10^{-4} \text{ Ci/cm}^3$ 로 계산되었다.

$$C_N = \frac{R_N}{V} \text{ TBq/m}^3 \dots\dots\dots (3)$$

정상조건에서의 허용 누설률(L_N)은 식 (4)로부터 $6.98 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{sec}$ 로 계산되었다.

$$L_N = \frac{R_N}{C_N} \dots\dots\dots (4)$$

2.3 공기/헬륨 기준 누설률

단위체적당 허용 누설률(L_N)은 운반용기의 압력 및 온도로부터 독립적이다. 따라서, 누설시험을 수행하기 위해서는 허용 누설률은 기체의 온도, 압력 및 누설 통로에 의존하는 공기 기준 누설률(Reference air leakage rate) 또는 헬륨 기준 누설률(Reference helium leak rate)로 변환되어야 한다. KSC-1 수송용기의 누설시험의 매체로는 공기 또는 헬륨을 사용하여 누설시험을 수행할 예정이다. 따라서 공기 기준 누설률 및 헬륨 기준 누설률을 산출하였다.

공기 또는 헬륨누설에서의 유체흐름은 상류 조건이므로 공기 기준 누설률(L_{Air}) 및 헬륨 기준 누

설률(L_{He})은 식 (5)에 의해 표 1과 같이 공기 기준 누설률은 3.34×10^{-5} ref · cm/sec, 헬륨 기준 누설률은 4.60×10^{-5} ref · cm/sec로 평가되었다.

$$L_{Re} = (F_c + F_m) (P_u - P_d) (P_d/P_u) \text{ cm/s} \dots\dots\dots (5)$$

2.4 습식운반

KSC-1 수송용기를 습식으로 운반할 경우 액체상의 누설은 식(8)로부터 5.88×10^{-6} cm/sec로 평가되었으며, 액체상의 방사능 방출률은 법규 제한치인 $A_2 \times 10^{-6}$ Ci/hr 보다 작은 1.72×10^{-1} Ci/hr로 계산되었다.

$$L_{WR} = F_c (P_u - P_d) \text{ cm/s} \dots\dots\dots (6)$$

습식운반 시 기체상의 누설은 식 (5)에 의해 8.05×10^{-5} cm/sec로 평가되었으며, 기체상의 방사능 방출률은 법규 제한치인 $A_2 \times 10^{-6}$ Ci/hr 보다 작은 1.65×10^1 Ci/hr로 계산되었다. 따라서, 액체상 및 기체상에 대한 방사능 방출률은 모두 법규 제한치에 비해 작기 때문에 KSC-1 수송용기는 습식으로 운반할 수 있다.

3. 사고조건에서의 격납

3.1 격납경계 설계기준

KSC-1 수송용기의 사고조건에서의 격납경계 설계기준은 운반사고조건에의 경우에 계산된 내부 cavity 온도 210.0 °C 및 내부압력 39.5 atm을 격납경계 설계기준으로 설정하였다.

3.2 허용누설률

사고조건에 대한 방사성 동위원소 핵종의 방출 제한치인 등가 A_{2eq} 값은 아래 식(1)에 의해 4.07 TBq(1.10×10^2 Ci)로 계산되었으며,

방사능의 허용 방출률(R_A)은 식 (7)에 의해 6.73×10^{-6} TBq(1.82×10^{-4} Ci/s) 로 계산되었다.

$$R_A = A_{2eq} \times \frac{1}{3600 \times 24 \times 7} \text{ TBq/s} \dots\dots\dots (7)$$

사고조건에서의 단위체적 당 방사능 농도(C_N)은 식 (3)로부터 2.9×10^{-2} Ci/cm³로 계산되었고, 허용 누설률(L_A)은 식 (4)로부터 6.28×10^{-3} cm/sec로 계산되었다.

3.3 공기/헬륨 기준 누설률

식 (5)에 의해 공기 기준 누설률은 표 2와 같이 2.47×10^{-4} ref · cm/sec, 헬륨 기준 누설률은 3.06×10^{-4} ref · cm/sec로 평가되었다.

4. 결 론

KSC-1 수송용기는 국내·외 운반용기 관련법규에서 요구하고 있는 정상운반조건 하에서 방사능 방출률이 10^{-6} · A₂/hour 이하를 유지하여야 하며, 이 조건은 공기 기준 누설률인 3.46×10^{-5} ref · cm/sec 또는 헬륨 기준 누설률인 4.75×10^{-5} ref · cm/sec 이하로 유지함으로써 만족된다.

운반사고조건 하에서 방사능 방출률은 A₂/week 이하를 유지하여야 하며, 이 조건은 공기 기준 누설률인 2.47×10^{-4} ref · cm/sec 또는 헬륨 기준 누설률인 3.06×10^{-4} ref · cm/sec 이하로 유지함으로써 만족된다.

5. 참고문헌

- [1] 교육과학기술부 고시 제2008-69호, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정".
- [2] IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 2005 Ed.
- [3] NUREG/CR-6487, Containment Analysis for Type B Packages Used to Transport Various Contents, 1996.

Table 1. 정상조건에서의 허용 누설률 및 기준 누설률

NORMAL CONDITIONS OF TRANSPORT? GAS SHIPMENT CALCULATED LEAK RATES					
Normal Operation Hole Size		Reference Leak Rate		Helium Test Leak Rate	
Air (Radioactive)		Air		Helium	
a (O-ring dia.)	0.4 Centimeter	a (O-ring dia.)	0.4 Centimeter	a (O-ring dia.)	0.4 Centimeter
Viscosity (cP)	0.0224 Centipoise	Viscosity (cP)	0.0183 Centipoise	Viscosity (cP)	0.0204 Centipoise
D (hole diameter)	6.446E-04 Centimeter	D (hole diameter)	6.446E-04 Centimeter	D (hole diameter)	6.486E-04 inches
Temperature	402 K	Temperature	298 K	Temperature	298 K
F ₁	4.57E-05	F ₁	1.54E-05	F ₁	5.23E-05
F ₂	4.54E-05	F ₂	1.55E-05	F ₂	4.28E-05
Maximum Allowable Leak Rate	6.98E-05 cm/s	Reference Leak Rate	3.48E-05 cm/s	Helium Test Leak Rate	4.75E-05 cm/s

Table 2. 사고조건에서의 허용 누설률 및 기준 누설률

HYPOTHETICAL ACCIDENT CALCULATED LEAK RATES					
Hypothetical Accident Hole Size		Reference Leak Rate		Helium Test Leak Rate	
Air		Air		Helium	
a (O-ring dia.)	0.4 Centimeter	a (O-ring dia.)	0.4 Centimeter	a (O-ring dia.)	0.4 Centimeter
Viscosity (cP)	0.0207 Centipoise	Viscosity (cP)	0.0170 Centipoise	Viscosity (cP)	0.0204 Centipoise
D (hole diameter)	1.073E-03 inches	D (hole diameter)	1.073E-03 inches	D (hole diameter)	1.073E-03 inches
Temperature	603 K	Temperature	788 K	Temperature	788 K
F ₁	3.73E-04	F ₁	4.20E-04	F ₁	4.11E-04
F ₂	2.37E-06	F ₂	7.45E-06	F ₂	2.01E-04
Maximum Allowable Leak Rate	6.28E-03 cm/s	Reference Leak Rate	2.47E-04 cm/s	Helium Test Leak Rate	3.06E-04 cm/s