

## KSC-4 수송용기의 핵임계도 분석

최 병일 · 신 희성 · 박 종묵 · 노 성기

한국에너지연구소

대전 대덕단지 사서함 7 호

### 요 약

가압 경수로형 사용후 핵연료 4개를 수송할 수 있는 KSC-4 수송 용기에 대한 핵임계도 분석을 KENO-IV 전산 코드와 AMPX 전산 코드계로 부터 생산한 19군 핵단면적 자료를 써서 수행하였다.

핵임계도 계산은 10CFR71에서 제시한 기준에 따라 보수적인 계산을 위해 수송 용기내에 사용후 핵연료 대신 신탄연료로 가정하여 정상 수송 조건 및 가상 사고 조건에 대해 수행하였다.

그 결과, 핵임계도는 정상 수송 조건 및 가상 사고 조건시에 각각 0.85289 및 0.94185이었다. 따라서 KSC-4 수송 용기의 핵임계도는 10CFR71에서 규정하고 있는 미임계 요건을 만족하고 있다.

### 서 론

사용후 핵연료 수송 용기는 반응도, 즉 핵임계도가 가장 큰 핵연료를 수송 용기에 장전하였을때, 하역 및 정상 수송 조건뿐만 아니라 가상 사고 조건하에서도 항상 미임계 상태를 실험적으로나 이론적으로 입증하여야 한다.

본래 사용후 핵연료 수송 용기의 미임계 상태를 실험적으로 입증하는 것이 바람직하지만 경제적인 이유로 이 방법을 택하기는 쉽지 않다. 따라서 대부분의 경우, 이론적인 방법을 택하는 것이 보통이다[1, 2].

본 논문은 가압 경수로형 사용후 핵연료 집합체 4개를 수송할 수 있는 KSC-4 수송 용기를 대상으로 하여 그 용기 구조재의 하나인 중성자 흡수재내 보론 농도의 편차 및 용기 제작상의 공차로 인한 이상 상태와 정상상태와의 핵임계도 차이를 포함한 정상 수송 조건 및 가상 사고 조건하에서의 핵임계도를 몬테칼로 방법으로 계산하고 미국의 방사성 물질 포장과 수송에 관한 법, 즉, 10CFR71[3]의 핵물질 운반물에 관한 핵임계 설계 기준에 따라 안전성을 확인하려고 하는데 그 목적이 있다.

계산에 사용한 몬테칼로 방법의 전산 코드는 KENO-IV[4]이며 핵단면적 자료는 AMPX[5] 전산 코드계로 생산한 19군 핵단면적 자료이었다. 이때 필요한 검증 계산은 미국 B&W사 CX-10 임계 장치[6]를 그 대상으로 수행하여 그 타당성을 먼저 확인하였다.

### 핵임계도 계산

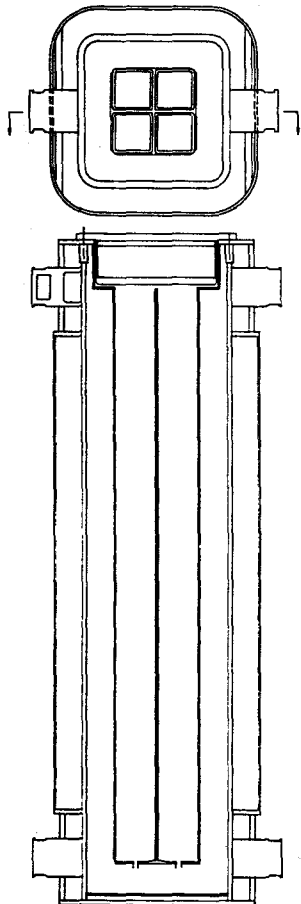
#### 1. KSC-4 수송 용기의 핵임계 계산 모델

KSC-4 수송 용기는 감마선 차폐재로 납과 중성자 차폐재로 레진을 사용한 것으로서 가압 경수로형 사용후 핵연료 4개를 운반할 수 있도록 설계한 것이며 그림 1에 표시한 단면도와 같이 사각형의 모형이지만 계산상의 편의를 위해 단순 원통형으로 근사화시켜 핵임계도 계산을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 KSC-4 수송 용기의 기하학적 모델을 그림 2와 그림 3에 도시하였다.

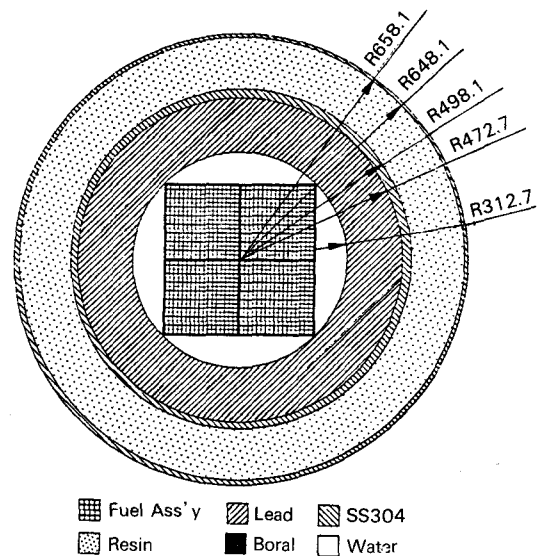
KSC-4 수송 용기의 핵임계 분석은 10CFR71에 따라 두 가지 조건, 즉 정상 수송 조건 및 가상 사고 조건으로 구분하여 수행하였으며 이 두 조건에 대한 설명은 표1에 수록하였다. 표1에 제시한 조건은 핵임

**Table 1.** Normal transport and hypothetical accident conditions for criticality analysis of KSC-4 cask.

조 건	가 정
정 상 수 송 조 건	1) 사용후 핵연료 집합체는 제어봉이나 가연성 독성물질이 포함되지 않은 PWR 17X17 배열의 신핵연료
	2) 핵연료의 U-235의 농축도는 3.3w/o
	3) 수송 용기내 핵연료 Basket의 존재를 무시
	4) 상부 뚜껑(Lid) 및 Bottom Plate는 공기로 간주 (단, 사용후 핵연료를 수송 용기에서 하역 또는 장전시에는 물이 채워지기 때문에 물로 가정)
	5) 핵연료봉 간격은 핵연료 집합체 설계간격
가 상 사 고 조 건	1) 정상 수송조건 1),2),3)항과 동일
	2) 외곽부분이 파손되어 중성자 차폐재인 레진이 없다고 가정
	3) 핵연료간의 Pitch는 반응도가 가장 높은 배열
	4) 수송 용기 내부에는 물이 채워져 있음



**Fig. 1.** Side and cross section of KSC-4 spent fuel shipping cask.



**Fig. 2.** Geometrical model of KSC-4 cask for KENO-IV calculation under normal transport condition (sectional view).

계 안전성 관점에서 보수적이다. 그림 4에는 KSC-4 수송 용기에 넣어 수송하게 될 17X17 가압 경수로형 사용후 핵연료에 대한 안내관 수로의 위치를 나타내었다.

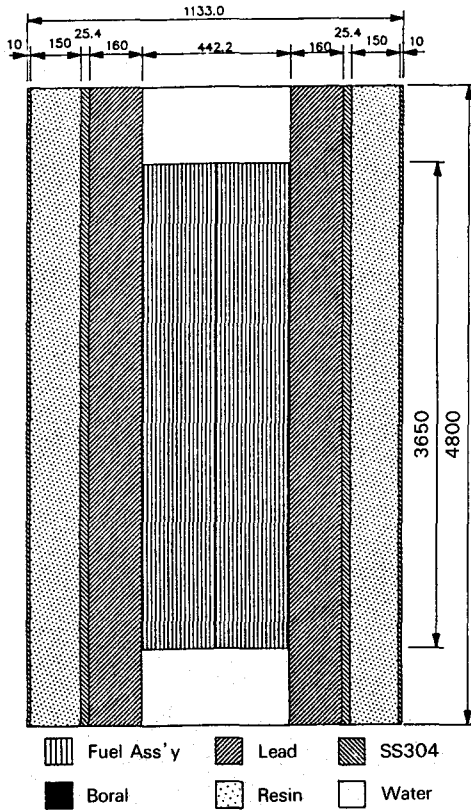


Fig. 3. Geometrical model of KSC-4 cask for KENO-IV calculation under normal transport condition (side view).

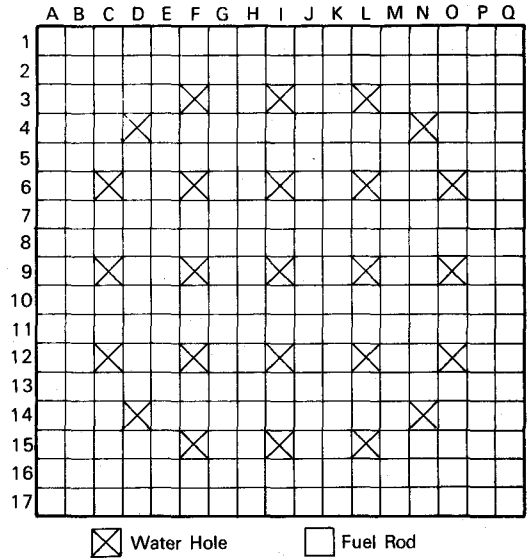


Fig. 4. Locations of water hole in 17x17 PWR assembly.

KSC-4 수송 용기의 정상 수송 조건과 가상 사고조건의 핵임계도 계산에 사용한 각 구성 물질의 특성 및 치수는 표2와 같으며 AMPX-KENO-IV 전산 코드계 입력 자료로 필요한 각 구성 물질의 원자수 밀도는 표3과 같다.

Table 2. Material description of KSC-4 shipping cask used in criticality analysis under normal transport and hypothetical accident conditions.

	Specification	Normal condition	Accident condition
Fuel assembly*	Fuel pellet O.D, cm	0.82	0.82
	Fuel rod O.D, cm	0.95	0.95
	Fuel rod pitch, cm	1.26	1.45
	Clad thickness, cm	0.57	0.57
	Clad material	Zircaloy-4	Zircaloy-4
	Active fuel height, cm	365.0	365.0
	Pellet density, %TD	95	95
	U-235 fuel enrichment, wt%	3.3	3.3
	No. of rods per assembly	264	264

to be continued

Table 2. (continued)

Neutron absorber	Material	Boral	Boral
	Thickness, cm	0.5	0.5
	Density, g/cc	2.64	2.64
Cavity	Material	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
	Diameter, cm	62.86	62.86
	Density, g/cc	1.0	1.0
Gamma shield	Material	Pb	Pb
	Diameter, cm	94.86	94.86
	Density, g/cc	11.34	11.34
Inner shell	Material	SS-304	SS-304
	Diameter, cm	99.94	99.94
	Density, g/cc	7.9	7.9
Neutron shield	Material	Resin	Damaged (No Resin)
	Diameter, cm	129.94	
	Density, g/cc	2.54	
Outer shell	Material	SS-304	Damaged (No Resin)
	Diameter, cm	131.94	
	Density, g/cc	7.9	

\* Grid material was not included in criticality calculation.

Table 3. Atom number density.

Nuclide	Atom number density, atoms/barn-cm						
	UO <sub>2</sub>	Zircaloy-4	Boral	Water	SS-304	Resin	Lead
U-235	8.00000E-4	—	—	—	—	—	—
U-238	2.24511E-2	—	—	—	—	—	—
O	4.64541E-2	—	—	3.33670E-2	—	2.70639E-2	—
Zr	—	4.24492E-2	—	—	—	—	—
Cr	—	9.87684E-5	—	—	1.66155E-2	—	—
Fe	—	1.76842E-4	3.41607E-4	—	6.03287E-2	—	—
Sn	—	5.32538E-4	—	—	—	—	—
H	—	—	—	6.67340E-2	—	6.02218E-2	—
C	—	—	1.16487E-2	—	2.37651E-4	2.33319E-2	—
Mn	—	—	—	—	1.57604E-3	—	—
Ni	—	—	—	—	6.96301E-3	—	—
Si	—	—	—	—	9.31641E-4	—	—
Pb	—	—	—	—	—	—	3.29582E-2
N	—	—	—	—	—	1.44459E-3	—
Al	—	—	3.82993E-2	—	—	8.06161E-3	—
B-10	—	—	7.84224E-3	—	—	—	—
B-11	—	—	2.92578E-2	—	—	—	—

2. 검증 계산

1) 핵군단면적 생산

KSC-4 수송 용기의 핵임계 분석에 사용한 AMPX-KENO-IV 전산 코드계의 검증 계산에는 미국 B&W 사 CX-10 임계 실험 결과[6]에서 KSC-4 수송 용기와 비슷한 8개 노심을 선택하였다. 먼저 검증 계산에 필요한 핵군단면적 자료를 생산하였다.

본 검증 계산에서는 ORNL에서 개발된 핵군단면적 자료(218 Group Neutron Cross Section Library) [7]를 기본 핵군단면적 자료로서 사용했다. 이 기본 핵군단면적 자료는 핵임계도 안전성 해석을 위해 개발된 218군 중성자 핵단면적 자료로서 140개 구간의 열중성자 및 열외 에너지 영역과 78개 속중성자 에너지 영역으로 되어있다. 이 기본 핵군단면적 자료로부터 시작하여 KENO-IV 전산코드에 입력되는 핵군단면적 자료를 생산하기까지의 계통도를 도시하면 그림 5와 같다.

그림 5에 도시한 기본 핵군단면적 자료로부터 AJAX코드를 써서 검증 계산의 핵임계도 분석에 필요한 핵중만을 선택하여 AJAX 핵군단면적 자료를

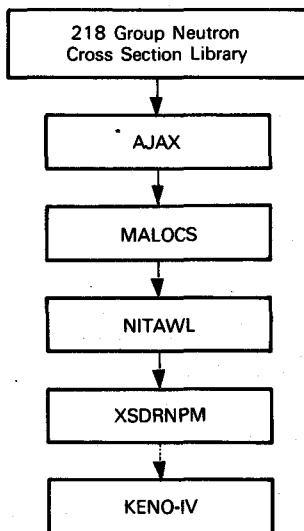


Fig. 5. Neutron cross section generation flow of AMPX-KENO-IV system.

구성하였다. 218군 에너지 핵단면적 자료인 AJAX 핵군단면적 자료로는 핵임계 분석을 수행하기가 어렵기 때문에 MALOCS 전산 코드를 이용하여 핵군단면적 자료를 생산하였다. 다음 노드하임(Nordheim)적 분용 NITAWL을 써서 핵연료봉 사이에서의 공명 자기차폐 효과를 고려하는 단코프(Dancoff) 인자를 Sauer[8]식에 의해 계산하였다. XSDRNPM 전산 코드를 써서 19군[9] 핵단면적 자료를 생산하였다.

2) 검증 계산 불확정성 결정 방법 및 결과

KENO-IV 전산 코드에 의한 핵임계도 계산 결과의 불확정성을 결정하는 방법은 KENO-IV 전산 코드를 여러 로심에 적용하여 얻은 각각의 핵임계도 값과 표준 편차로부터 평균 핵임계도와 표준 편차를 임계 실험치와 비교하여 결정한다. 각 로심에 대한 핵임계도와 표준 편차로부터 평균 핵임계도( $\bar{K}_{eff}$ )와 표준 편차( $\sigma_{\bar{K}_{eff}}$ )를 구하는 식은 다음과 같다[10].

$$\bar{K}_{eff} = \frac{\sum(K_{eff}^i/\sigma_i^2)}{\sum(1/\sigma_i^2)} \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma_{\bar{K}_{eff}}^2 = \frac{1}{\sum(1/\sigma_i^2)} \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $K_{eff}^i$  및  $\sigma_i$ 는 한 로심 i에 대한 핵임계도 및 그 핵임계도에 대한 표준 편차이다. 따라서 KENO-IV로 계산한 검증 계산시의 핵임계도는 다음과 같이 주어진다.

$$\text{검증 계산시의 핵임계도} = \bar{K}_{eff} \pm \sigma_{\bar{K}_{eff}} \dots \dots (3)$$

KENO-IV 전산 코드로 계산한 핵임계도  $K_{eff}$ 는 과대 평가되었으며 이 결과와 실험치와의 비교로서 검증 계산에 따르는 불확정성을 구할 수 있다. 이것은 핵임계도 실험치 1.00000과의 차이로서

$$\Delta K = 1.00000 - \bar{K}_{eff} \dots \dots \dots (4)$$

과 같으며 계산에 따르는 불확정성 (computing round-up error,  $U_b$ )을 여러 로심에 대해 수행하여 얻은 계산치들이 t분포를 한다고 가정하여 구할 수 있는데, 자유도 7인 95% 신뢰 구간에서  $U_b$ 는 다음과 같은 식으로 주어진다[11].

$$U_b = 2.365 \sigma_{K_{eff}} \dots \dots \dots (5)$$

$\Delta K$ 와  $U_b$ 는 KSC-4 수송 용기의 핵임계도 계산 결과에 보정하여야 된다.

$\Delta K$ 와  $U_b$ 의 값을 구하기 위해 AMPX-KENO-IV 전산 코드계를 사용하여 본 논문에서 채택한 8개 임계 실험 로심에 대하여 검증 계산한  $K_{eff}^i$ 와  $\sigma_i$ 의 값을 표4에

제시하였다. 표4에 제시한 각 임계로심의 핵임계도는 실험치 1.00000과 근접한 값을 보여 주고 있으며 각 로심에 대해 계산한 핵임계도 및 표준 편차로부터 검증 계산시 평균 핵임계도 및 표준 편차는 각각(1)식과 (2)식으로 부터 계산할 수 있다.

$$\bar{K}_{eff} \pm \sigma_{\bar{K}_{eff}} = 1.00010 \pm 0.0017 \dots \dots \dots (6)$$

**Table 4.** Results of KENO-IV calculation for benchmark cores.

Core	Spacing between assembly pins (pitch)	Boron concentration in neutron absorber (%)	Boron concentration in water (ppm)	Critical height (cm)	$K_{eff}^i \pm \sigma_i$
1	—	none	none	143.88	$1.00725 \pm 0.00539$
2	0	none	1037	144.29	$0.99467 \pm 0.00409$
13	1	0.242	15	150.27	$1.00710 \pm 0.00621$
13a	1	0.242	28	149.69	$1.00553 \pm 0.00503$
14	1	1.257	92	149.12	$1.00024 \pm 0.00530$
16	2	0.401	121	149.16	$0.99862 \pm 0.00535$
18	2	0.242	197	149.02	$1.00130 \pm 0.00469$
21	3	0.100	72	151.69	$0.99211 \pm 0.00490$

이 값으로부터 (4)식과 (5)식을 써서 구한  $\Delta K$ 와  $U_b$ 의 값은 각각 -0.00010과 0.00402이 된다.  $\Delta K$ 가 부의 값을 갖는 것은 AMPX-KENO-IV 전산 코드계가 절대값  $\Delta K$  만큼 과대 평가 된다는 것을 의미하므로 KSC-4 핵임계도 계산 결과에  $\Delta K$  만큼 보정해 주어야 한다. 이와 같은 검증 계산을 통해 구한 절대값  $\Delta K$ 는 0.00 010으로서 핵임계도 실험치와 본 계산치가 거의 일치하는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서 사용하는 핵임계 분석 방법은 타당한 것으로 판단된다.

3. KSC-4 수송 용기의 핵임계도 계산

KSC-4 수송 용기의 핵임계 분석을 위한 19군 핵단면적 자료는 앞에서 기술한 방법에 의해 생산하였으며, KENO-IV 전산 코드에서 배취(hatch) 당 중성자 수를 300으로 하고 배취 수를 100으로 하여 중성자의 전이력을 30,000으로 잡았다. 그리고 초기 선원은 평탄한 분포를 하고 있는 것으로 보았으며 95 % 신뢰도를 갖는 핵임계도를 산출하였다.

KSC-4 수송 용기의 핵임계도 분석을 위해 핵군단

면적 자료는 표1에 제시한 조건에 대해 생산하였는데 정상 수송 조건에서 핵연료봉간 간격을 1.26cm로 하여 구했으며 가상 사고 조건에서 사용한 최대 반응도 핵연료봉간 간격은 다음과 같이 결정하였다. 중성자 독성 물질이 없다는 가정하에서 핵연료봉간의 간격을 0.8cm로부터 1.7cm까지 변화 시키면서 핵임계도를 계산하여 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 알 수 있듯이 핵연료봉 간격이 1.45cm일 때 최대반응도 값을 갖는다. 따라서 가상 사고 조건에서 핵군단면적 자료는 핵연료봉 간격이 1.45cm일 때를 기준으로 하여 생산하였으며 최대 반응도 배열은 내관수로에 핵연료봉이 없고 핵연료봉 간격이 1.45cm인 가압 경수로형 17X17 배열의 핵연료 집합체로 가정하였다.

본 논문에서는 10CFR71에 따라 정상 수송 조건에서는 단일 수송 용기와 무한 배열 수송 용기를 고려하였다. 한편 가상 사고 조건에서는 단일 수송 용기의 중성자 차폐재가 유실되고 동시에 침수되는 경우와

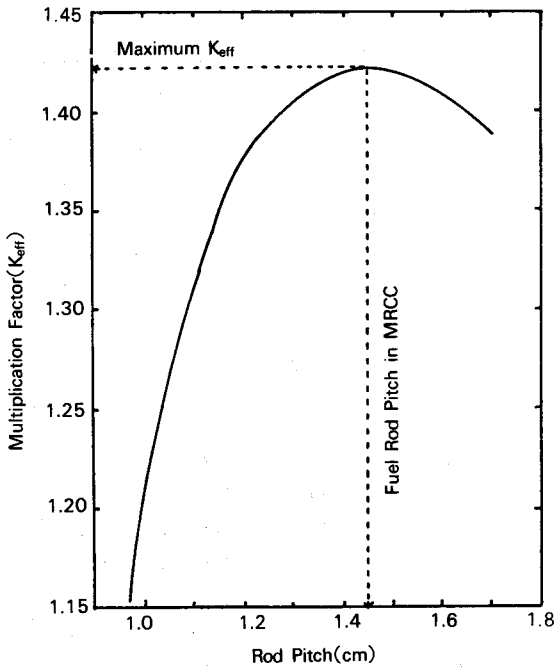


Fig. 6. Determination of the pitch between fuel rods in the cask without poisonous material which has the most reactive credible configuration (MRCC) of the fuel rods.

과손 수송 용기가 무한 배열한 형태도 다루었다. 무한 배열의 경우에는 용기간에 물이 채워져 있는 경우를 취급하였다.

4. KSC-4 수송 용기의 핵임계도 보정 방법

KSC-4 수송 용기의 핵임계도를 계산할 때 KENO-IV 몬테칼로 계산 방법상에서 발생하는 통계적 불확정성, 검증 계산상의 불확정성, 수송 용기 구조재의 하나인 중성자 흡수재내 보론 농도의 편차 및 용기 제작상의 공차로 인한 이상 상태와 정상 상태와의 핵임계도 차이에서 발생하는 불확정성이 발생한다. 따라서 KENO-IV 전산 코드로 계산한 제작상의 공차 및 보론 농도의 편차를 고려하지 않은 핵임계도, 즉 정상 수송 조건에서의 핵임계도(K<sub>eff</sub><sup>N</sup>)는 위에서 제시한 불확정성을 보정한 핵임계도 (K)가 된다.

$$K = K_{eff}^N + U_i \dots\dots\dots(7)$$

여기서 U<sub>i</sub>는 위에서 고려한 불확정성의 합이며 다음과 같이 계산된다.

$$U_i = \Delta K + (U_b^2 + U_c^2 + \Delta K_j^2)^{1/2} \dots\dots\dots(8)$$

(8)식에서 제시한 ΔK와 U<sub>b</sub>는 검증 계산시에 발생하는 불확정성으로서 (4)식과 (5)식에 의해 구할 수 있으며 ΔK<sub>j</sub>는 보론 농도(j=B) 편차 및 용기 제작상(j=F)의 공차에 의한 불확정성이다.

KENO-IV 전산 코드에 의한 계산상의 통계적 불확정성 U<sub>c</sub>는 제작상 공차 및 보론 농도의 편차를 고려하지 않았을 때의 핵임계도에 대한 표준 편차(σ<sub>N</sub>)를 사용하였다. 즉,

$$U_c = \sigma_N \dots\dots\dots(9)$$

ΔK<sub>j</sub>는 정상 수송 조건에서의 핵임계도와 제작상의 공차나 보론 농도 편차를 고려한 핵임계도의 차이므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta K_j = K_{eff}^j - K_{eff}^N \dots\dots\dots(10)$$

여기서 ΔK<sub>j</sub>는 제작상의 공차(j=F) 또는 보론 농도의 편차(j=B)를 고려한 핵임계도이다.

(7) 식으로 보정한 핵임계도를 KSC-4 수송 용기의 핵임계도 분석 결과의 평가에 이용한다.

결과 및 토의

KSC-4 수송 용기의 핵임계 안전성 분석을 위해 정상 수송 조건 및 가상 사고 조건을 고려하여 KSC-4 수송 용기의 핵임계도를 AMPX-KENO-IV 전산 코드를 이용하여 계산하였다.

수송 용기의 핵임계 안전성은 단일 수송 용기뿐만 아니라 여러 개의 수송 용기가 배열된 경우에도 안전성을 유지해야 한다. 따라서 위 두 가지 경우를 단일 수송 용기나 무한 배열에서 KSC-4 수송 용기의 핵임계도를 계산하였다. KSC-4 수송 용기의 핵임계도 계산시 발생하는 통계적 오차와 핵임계도 증가의 원인이 되는 제작 공차 및 보론 농도 편차에 의한 불확정성을 고려하여 KSC-4 수송 용기의 핵임계도를 구하기 위해 정상 수송 조건 및 가상 사고 조건에 대해 단일 용기와 무한 배열의 경우로 구분하여 핵임계도를 계산하였는데 그 결과는 표 5 및 6과 같다. 표 5에는 정상 수송 조건에서 KSC-4 수송 용기에 대한

**Table 5.** Results of criticality calculation for KSC-4 cask under normal condition.

Array condition of cask	Uncertainty calculation of K			$U_c = \sigma_N \Delta K_j = K_{eff}^i - K_{eff}^N$	Uncertainty of benchmark calculation		$U_i$	K	
	Condition	Error (%)	$K_{eff}^i \pm \sigma_i$		$\Delta K$	$U_b$			
Single cask	Normal	0	0.84345 $\pm 0.00410$						
(optimum inter-spersed hydrogeneous moderation and full water reflection)	Fabrication error	4	0.83431 $\pm 0.00439$	0.00410	0.00914	0.00010	0.00402	0.00945	0.85289
	Boron content error	5	0.84669 $\pm 0.00420$		0.00324				
Infinite array	Normal	0	0.84345 $\pm 0.00410$						
(optimum inter-spersed hydrogeneous moderation and full water reflection)	Fabrication error	4	0.83431 $\pm 0.00439$	0.00410	0.00914	0.00010	0.00402	0.00945	0.85289
	Boron content error	5	0.84669 $\pm 0.00420$		0.00324				

핵임계도 계산 결과를 나타내며 표 6은 가상 사고시 계산 결과이다. 표 5과 6으로부터 알 수 있듯이 제작 공차 및 보론 농도 편차를 고려하지 않은 KSC-4 수송 용기의 핵임계도( $K_{eff}^N$ )는 정상 수송 조건에서 단일 용기나 무한 배열에서 0.84345이었으며 가상 사고 조건에는 각각 0.93203 및 0.93322였다.  $\Delta K$ 와  $U_b$ 는 검증 계산에서 서술한 것과 같이 AMPX-KENO-IV 전산 코드계의 불확정성으로서 각각 0.00010과 0.00402이었다. KSC-4 수송 용기의 핵임계 계산시 KENO-IV 전산 코드에 의한 통계적 편차  $U_i$ 는 전술한 것과 같이 제작 공차 및 보론 농도 편차를 고려하지 않은 핵임계도의 표준 편차로서 정상 수송시 0.00410이며 가상 사고시 단일 용기 및 무한 배열인 경우 각각 0.00404 및 0.00383이었다. 제작 공차 및 보론 농도 편차로 인한 이상 상태와 정상 상태와의 핵임계도 차이( $\Delta K_j$ )는 (10)식에 의해 계산하였으며 핵임계도가 증가하

는 (보수적인 핵임계도를 구하기 위해) 양의  $\Delta K_j$ 값을 취하였다. 따라서 정상 수송 조건에서는 0.00324였으며 가상 사고 조건시 단일 수송 용기와 무한 배열에 대해서 각각 0.00209 및 0.00196이었다. 이와 같이 각각의 불확정성을 고려하여 전체의 불확정성( $U_i$ )를 (8)식에 의해 계산할 때 단일 용기나 무한 배열에서 정상 수송 조건시 0.00945이고 가상 사고 조건시 각각 0.00911 및 0.00873이었다. 따라서 각 경우의  $U_i$ 값을 제작 공차 및 보론 농도 편차를 고려하지 않은 KSC-4 수송 용기의 핵임계도에 보정하여 준 최종 핵임계도는 정상 수송 조건시 단일 용기나 무한 배열에서 0.85289이 되고 가상 사고 조건시 단일 수송 용기의 경우 0.94104이며 무한 배열일 때 0.94185로 약간 차이가 있었다. 본 논문에서 취급한 KSC-4 수송 용기의 핵임계도는 최악의 수송 조건하에서 최대 0.94185로서 미임계이므로 KSC-4 수송 용기는 핵임계



**Table 6.** Results of criticality calculation for KSC-4 cask under hypothetical accident condition.

Array condition of cask	Uncertainty calculation of K				$U_c = \sigma_N \Delta K_j = K_{eff}^I - K_{eff}^N$		Uncertainty of benchmark calculation		$U_i$	K
	Condition	Error (%)	$K_{eff}^i \pm \sigma_i$	$\Delta K$			$U_b$			
Single cask	Normal	0	0.93203 $\pm 0.00404$							
(optimum inter-spersed hydro-geneous moderation and full water reflection)	Fabrication error	4	0.93412 $\pm 0.0042$	0.00404	0.00209	0.00010	0.00402	0.00911	0.94104	
	Boron content error	5	0.92657 $\pm 0.00393$		-0.00546					
Infinite array	Normal	0	0.93322 $\pm 0.00383$							
(optimum inter-spersed hydro-geneous moderation and full water reflection)	Fabrication error	4	0.93518 $\pm 0.00422$	0.00383	0.00196	0.00010	0.00402	0.00873	0.94185	
	Boron content error	5	0.93255 $\pm 0.00419$		-0.00067					

관점에서 안전하다고 판단된다.

참고 문헌

결 론

가압 경수로형 사용후 핵연료 집합체 4개를 수송할 수 있는 KSC-4 수송 용기에 대한 핵임계도 분석 결과 정상 수송 조건하에서의 최대 핵임계도는 단일 용기에서나 무한 배열에서는 0.85289으로 나타났으며 가상 사고 조건하에서 중성자 차폐재인 레진이 파손된 무한 배열 수송 용기에 대한 최대 핵임계도는 0.94185로 나타났다.

이상의 핵임계도 분석 결과로 보아 정상 수송 조건뿐만 아니라 극단적인 가상 사고 조건에서도 핵분열성 수송물에 대하여 10CFR71에서 규정하고 있는 미입계 요건을 만족하므로 고려된 수송 용기는 핵임계 관점에서 안전하다고 볼 수 있다.

1. Safety Analysis Report-NI-1/2 Spent Fuel Shipping Cask, NL Ind., Inc.(1975).
2. L.B.Shappert, *A Guide for the Design, Fabrication, and Operation of Shipping Casks for Nuclear Applications*, ORNL-NSIC-68(1970).
3. 10CFR Part 71 *Packaging of Radioactive Material for Transport and Transportation of Radioactive Material and Certain Conditions*, U.S.A(1983).
4. L.M.Petri and N.F.Cross, *KENO-IV ; An Improved Monte Carlo Criticality Program*, ORNL-4938(1975).
5. N.M.Greene, J.L.Lucius, L.M.Petrie, W.E.Ford, J.E. White and R.Q.Wright, *AMPX : A Modular code System for Generating Coupled Multigroup Neut-*

- ron-Gamma Libraries for ENDF/B*, ORNL/TM-3706(1976).
6. G.S.Hoovler, M.N.Baldwin, R.L.Eng and F.G.Welfare, "Criticality experiments supporting close proximity water storage of power reactor fuel," *Nucl. Tech.* 51, 217(1980).
  7. W.E.Ford, III, C.C.Webster, and R.M.Westfal, *218-Group Neutron Cross Section Library in the AMPX Master Interface Format for Criticality Safety Studies*, ORNL/CSD/TM-4(1976).
  8. A. Sauer, "Approximate escape probabilities," *Nucl. Sci. Eng.* 16, 329-335(1963).
  9. U.C.Lee, *Test and Verification of CDC Criticality-Related Production Codes* (1978).
  10. Philip R. Bevington, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Science*, p. 73, McGraw-Hill, New York(1969).
  11. W.J.Dixon and F.J.Massey, Jr., *Introduction to Statistical Analysis*, McGraw-Hill, New York(1969).

## Criticality Analysis of KSC-4 Spent Fuel Shipping Cask

B.I.Choi, H.S.Shin, C.M.Park and S.G.Ro

*Korea Advanced Energy Research Institute, Daejeon, Korea*

### Abstract

The nuclear criticality of the KSC-4 shipping cask which can load four assemblies of PWR spent fuel was analyzed using KENO-IV computer code and 19-group nuclear cross section set generated from 218-group neutron cross section library(DLC-43/CSRL) using AMPX system. In accordance with 10CFR71, the analysis was performed for fresh fuel assemblies, instead of the spent fuels, under both normal transportation and hypothetical accident conditions.

The calculated maximum multiplication factors( $K_{eff}$ ) of the KSC-4 cask were 0.85289 and 0.94185 for the normal transportation and hypothetical accident conditions, respectively. The highest  $K_{eff}$  of the KSC-4 cask is within the subcritical limit prescribed in 10CFR71 and accordingly the KSC-4 cask is safely designed in terms of nuclear criticality.