'2000 춘계원자력학술발표회 논문집
한국원자력학회

사용후연료 조밀저장대 핵임계해석을 위한 검증계산

Benchmarking Evaluation for Criticality Analysis of High Density Spent Fuel Storage Rack

윤정현, 전제근, 고덕준, 하종현, 송명재, 김병태, 조규성*

원자력환경기술원/한국전력공사
대전광역시 유성우체국사서함 149호
*한국과학기술원

요 약

울진 원전2호기 사용후연료저장조 정상상태 핵임계 해석을 위하여 SCAEL 4.4 시스템의 CSAS 모듈(KENO-V.a.)과 CASMO-3 전산코드의 검증계산을 수행하였다. 핵임계 전산코드들의 검증계산을 통하여 전산코드의 bias 및 불확실도를 평가하였다. 검증계산결과에 따르면 SCALE 4.4 시스템 중 CSAS 모듈(KENO-V.a.)의 bias는 0.00656으로 평가되었으며, bias 불확실도는 95% 확률 95% 신뢰도 구간에서 0.00731로 계산되었다. 또한 SCALE-CSAS 모듈에 의한 울진 원전2호기 사용후연료저장조에 대한 핵임계 계산결과를 CASMO-3 전산코드와 비교하였을 때, 반응도 값은 초기농축도에 관계없이 두 전산코드 모두 비슷한 경향을 나타내었다.

Abstract

In order to evaluate criticality of spent fuel storage pool in Ulchin Unit 2 under normal operation, a series of benchmark calculations were carried out using a CSAS module of SCALE 4.4 along with CASMO-3 computer code. Through the benchmark calculations for the criticality computer codes, bias and uncertainties of the computer codes were evaluated. We can take 0.00656 of bias result for CSAS(KENO-V.a.) of SCALE system and its uncertainty was calculated as 0.00731 with a 95% probability at the 95% of confidence level. Criticality evaluation results for spent fuel storage pool of Ulchin Unit 2 using SCALE system had a very similar trend compared with CASMO-3 results.

1. 서 론

사용후연료 조밀저장대로 사용되는 보라플렉스는 수중환경에서 장기간 방사선에 조사될 경우 물성변화를 일으켜 보라플렉스 저장대 표면의 실리카가 서서히 용해되는 것으로 알려지고 있다[1]. 최근 몇 년간 울진

원전2호기 사용후연료 저장조에서도 실리카 농도의 증가현상이 나타나고 있는데, 이러한 현상은 저장조내 보라플렉스 저장대의 손상이 진행되고 있는 것으로 추정된다. 보라플렉스는 실리카와 B_4C가 같은 무게비로 구성되어 있어서, 실리카가 용해될 경우 실리카에 고정된 B_4C도 함께 용출될 가능성이 있다.

따라서 이러한 실리카용출로 인한 보라플렉스 저장대의 성능저하를 평가하기 위한 핵임계 안전성평가의 재수행이 요구된다. 본 연구에서는 울진 원전2호기 조밀저장대의 핵임계 안전성 평가의 일환으로 SCALE 4.4 시스템 중 KENO-V.a. 코드가 주축인 CSAS 모듈과 2차원 셀코드인 CASMO-3의 핵임계 검증계산을 수행하였다. 검증계산을 통하여 얻어지는 전산코드의 bias 및 불확실도는 핵임계 평가에 활용된다. 전산코드 검증계산의 목적은 사용후연료저장조 핵임계 해석에 사용되는 CASMO-3 코드와 27그룹 SCALE 핵단면적을 이용하는 CSAS모듈(NITAWL-KENO.V.a.)을 검증하는 것이다. 전산코드 검증계산은 사용후연료저장조 구조와 유사한 핵임계 실험결과를 이용하여 수행하였다.

2. 연소도효과를 고려한 사용후연료 조밀저장대 핵임계평가법

사용후연료 저장조의 최대 k_{eff}값은 저장대 및 핵연료 가공시의 제작공차에 의한 불확실도를 포함하여 95%의 신뢰도에서 95%의 확률로 0.95이하를 만족하여야 한다. 이러한 불확실도는 통계적인 조합으로 구성되며, 최대 k_{eff}는 다음과 같이 표현된다[2].

$$k_{eff}^{max} = k_{Calc} + \triangle k_{Bias} + \triangle k_{Ax} + \triangle k_{Unc} \quad \text{.....(1)}$$

k_{Calc} : 반응도 계산값

$\triangle k_{Bias}$: 검증계산 계산값과의 바이어스

$\triangle k_{Ax}$: 축방향 연소도분포 영향

$\triangle k_{Unc}$: 모든 불확실도의 종합적 영향

여기서, $\triangle k_{Unc}$는 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

$$\triangle k_{Unc} = (\triangle k_b^2 + \triangle k_i^2 + \triangle k_g^2 + \triangle k_t^2 + \triangle k_E^2 + \triangle k_\rho^2 + \triangle k_d^2)^{1/2} \quad \text{.....(2)}$$

$\triangle k_b$: 바이어스 불확실도

$\triangle k_i$: 셀 박스 내경의 불확실도

$\triangle k_g$: water gap 두께의 불확실도

$\triangle k_t$: 셀 박스벽 두께의 불확실도

$\triangle k_E$: 농축도 불확실도

$\triangle k_\rho$: UO_2 밀도의 불확실도

$\triangle k_d$: 감손계산의 불확실도

식(1)과 (2)의 $\triangle k_{Bias}$와 $\triangle k_b$는 사용후연료 조밀저장대와 유사한 핵임계실험과의 검증계산을 통하여 구해질 수 있다. 본 연구에서는 핵임계평가에 사용되는 SCALE(KENO-V.a), CASMO-3 전산코드를 PNL 및 B&W사 핵임계실험 결과와 비교하여 검증계산을 수행하였다. 검증계산 방법 및 유사 검증실험의 상세한 내용은 다음항에 기술하였다.

3. 핵임계평가 전산코드 검증계산 방법 및 계산 모델

3.1 핵임계도 계산코드의 검증방법

핵임계 계산코드의 검증은 전산코드의 수치해석 방법과 이에 사용되는 입력자료의 검증을 의미한다. 입력자료 중에는 기하학적 구조, 핵종 구성비와 핵단면적이 핵임계도에 영향을 주는 중요한 인자로서, 동일한 기하학적 구조와 핵종 구성비를 갖는 핵임계 실험자료를 이용할 경우 핵자료와 수치해석 방법에 대한 검증으로 좁혀진다. 그러나 이 두 가지를 분리해서 검증하기는 매우 어려우므로, 핵임계 실험에서 얻은 핵임계도 실험값과 계산값을 비교함으로써 수치해석 방법과 핵자료를 동시에 검증한다.

전산코드 검증을 위한 이상적인 핵임계실험은 핵임계도에 영향을 미치는 인자인 기하학적인 구조, 핵물질 조성비 및 구성핵종 등의 인자가 계산대상 핵물질계와 동일하여야 하지만, 이와 같은 조건을 만족하는 핵임계 실험자료를 구하기는 어려우므로 유사한 핵임계 실험자료를 이용하여 검증계산을 수행한 후 영향인자의 차이만큼을 고려한다. 그림 1에 핵임계 전산코드 검증계산 수행을 위한 흐름도를 나타내었다.

검증계산 결과 나온 계산값들의 통계처리는 각 실험자료에 대한 핵임계도 계산값과 실험값을 비교하여 실험값에 대한 계산값의 오차를 구한 후, 계산오차 표본의 평균값과 표준편차를 다음과 같은 두 식으로 각각 구할 수 있다[3].

$$\overline{\triangle k} = \frac{\sum_i \frac{\triangle k_i}{\sigma^2_{\triangle k_i}}}{\sum_i \frac{1}{\sigma^2_{\triangle k_i}}} \quad \text{.....(3)}$$

$$\overline{\sigma^2_{\triangle k}} = \frac{N}{N-1}\left[\frac{\sum(\frac{\triangle k_i}{\sigma_{\triangle k_i}})^2}{\sum(\frac{1}{\sigma^2_{\triangle k_i}})} - \overline{\triangle k}^2\right] \quad \text{.....(4)}$$

이 계산오차가 계산오차 모집단에서 무작위로 추출된 표본이라고 가정하면 계산오차 표본의 평균값과 표준편차를 이용하여 모집단의 평균값이 존재하는 95% 신뢰구간을 추정할 수 있으며, 이를 이용하여 모집단에 속한 임의의 계산오차 표본에 대한 95/95 신뢰도를 갖는 범위를 결정할 수 있다. 사용후연료저장조에 대한 핵임계도 계산에서 계산코드와 핵자료의 95/95 신뢰도를 갖는 계산오차 ($\triangle k_u$)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\triangle k_u = \overline{\triangle k} \pm k_n \overline{\sigma_{\triangle k}} \quad \text{.....(5)}$$

k_n은 95/95의 신뢰도를 갖는 허용한계다.

3.2 검증계산

가. SCALE 4.4(KENO-V.a) 전산코드 검증계산[4]

- PNL Experiment(4.31wt% ^{235}U)[5, 6]

  PNL(Pacific Northwest Laboratory) Critical Mass Lab.의 핵임계실험은 0.952 cm 두께에 1.8×3.0×2.1 m 깊이의 상부 개방형 철제 실험로에 알루미늄 피복관으로 제조된 4.31w/o의 UO_2 연료봉을 이용하여 실시되었다. 연료봉의 하부는 2.54 cm 두께의 아크릴 지지판으로 고정되었으며, 아크릴 지지판은 15.3×5.08×0.635 cm의 알루미늄 채널 앵글로서 지지되었고, 연료봉의 피치는 2 겹으로 된 아크릴 격자판으로 되어있다. 연료 클러스터 사이에는 다양한 종류의 중성자 흡수재가 이용되었다. 실험에 사용된 연료봉의 제원이 표 1에 기술되어 있다. 그리고 표 2에 4.31w/o ^{235}U 농축도 핵연료에 대한 PNL 핵임계실험의 28개 노심조건을 수록하였다. 그리고 그림 2과 그림 3에 핵임계실험의 연료 클러스터 배치도가

주어져 있다.

- PNL Experiment(2.35w/o ^{235}U)[7]

  이 실험에서는 2.032cm 격자셀로 이루어진 2.35w/o ^{235}U 농축도의 연료 클러스터가 사용되었다. 표 3에 2.35w/o ^{235}U 농축도 핵연료에 대한 PNL 핵임계실험의 10개 노심조건을 수록하였다.

- B&W(Bobcock & Wilcox) 사의 CX-10 Experiment[8]

  B&W사의 CX-10 검증 실험로는 총 9개의 연료 다발을 장전하거나 연료봉 형태로도 장전할 수 있으며, 기계적인 조작으로 연료 다발간의 피치를 조정하면서 핵임계에 도달하게 하거나 연료를 둘러싼 감속재인 물의 높이나 감속재내의 보론 농도를 조절함으로써 핵임계에 도달할 수 있도록 설계/제작되었다. CX-10 핵임계 실험로는 형태가 사용후연료 저장조의 축소형태나 수송용기와 비슷한 배열을 하고 있어 핵임계 검증계산을 위하여 많이 활용된다. CX-10 실험로의 또 다른 핵임계 제어방법은 사용후연료 수송용기의 중성자 흡수재로 많이 사용되는 보랄과 탄화보론(B_4C)봉을 사용하였다. 표 4와 표 5에 각각 CX-10 실험로의 제원과 B&W사 핵임계실험의 노심조건을 기술하였다. 그리고 그림 4, 5, 6에 실험별 노심구조를 나타내었다.

4. 핵임계평가 전산코드 검증계산 결과

4.1 검증계산 결과

표 6에 CSAS모듈(KENO-V.a)의 핵임계 검증계산의 결과를 수록하였다. 표 6의 계산오차 값을 식(1)과 식(2)에 대입하여 계산오차 표본의 평균값과 표준편차를 구하면, 각각 0.00656과 0.00373이 된다. 검증계산에서 계산결과들이 t 분포를 한다고 가정하면 95% 확률 95% 신뢰도 구간에서 자유도가 40인 경우 k_{25}=1.960이며[9], bias 불확실도는 0.00731이 된다.

4.2 CASMO-3코드와 검증계산결과 비교

울진 원전2호기 사용후연료 저장조에 대한 핵임계 계산결과를 CASMO-3 전산코드와 비교하였다. CASMO-3는 Studsvik Energiteknik사에서 개발되었으며 무한배열의 저장대 셀계산에 적합한 전산코드이다[10]. 그림 7에 SCALE 4.4 시스템의 CSAS 모듈(KENO-V.a) 해석결과와 CASMO-3 해석결과가 핵연료 초기농축도별로 주어져 있다. 그림 7에 의하면 반응도값은 초기농축도에 관계없이 두 전산코드 모두 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

사용후연료 조밀저장대 핵임계 안전성평가를 위한 전산코드의 검증계산에서 SCALE 4.4 시스템 중 CSAS 모듈(KENO-V.a)의 bias는 0.00656로 평가되었으며, bias 불확실도는 95% 확률 95% 신뢰도 구간에서 0.00731로 계산되었다. 또한 울진 원전2호기 사용후연료저장조에 대한 핵임계 계산결과를 CASMO-3 전산코드와 비교하였을 때, 반응도 값은 초기농축도에 관계없이 두 전산코드 모두 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이 결과들은 울진 원전2호기 사용후연료저장조의 미임계 여유도의 추가확보를 위한 핵임계 해석의 전산코드로 사용한 SCALE-CSAS 모듈과 CASMO-3가 적절함을 나타내주는 결과이다. 본 계산을 통해 얻어진 전산코드 체계 전반에 대한 bias 및 불확실도 값은 향후 정상상태 및 가상사고 조건에 대한 핵임계 해석 평가 결과에 대한 신뢰성을 더할 수 있는 중요한 자료로 활용될 것이다.

참 고 문 헌

1. Northeast Technology Corp., Guidelines for Boraflex Use in Spent Fuel Storage Racks, EPRI TR-103300, Dec. 1993.
2. Stanley E. Turner, Criticality Safety Evaluations of the Fuel Storage Rack for Ulchin Unit 2, Holtec Report HI-951287, Holtec International,, July 1995.
3. R. E. Walpole and R. H. Myers, Probability and Statistics for Engineers and Scientists, Prentice Hall, 1993.
4. SCALE-4.4 Manual, ORNL, 1998.
5. S. R. Bierman and E. D. Clayton, Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35wt% and 4.31wt% ^{235}U Enriched UO_2 Rods in Water with Steel Reflecting Walls, NUREG/CR-1784, PNL, Apr. 1981.
6. S. R. Bierman and B. M. Durst, Critical Separation Between Subcritical Clusters of 4.29wt% ^{235}U Enriched UO_2 Rods in Water with Fixed Neutron Poison, NUREG/CR-0073, PNL, May 1978.
7. US NRC, Critical Separation Between Subcritical Clusters of 2.35wt% ^{235}U Enriched UO_2 Rods in Water with Fixed Neutron Poison, PNL-2438, PNL, Oct. 1977.
8. M. N. Baldwin et al., Critical Experiments Supporting Close Proximity Water Storage of Power Reactor Fuel, BAW-1484-7, The Babcock & Wilcox Co., July 1979.
9. W. Mendenhall, Introduction to Probability and Statistics, Duxbury Press, 1987.
10. M.Edenius and A. Ahlin, CASMO-3: New Feature, Benchmarking, and Advanced Applications, Nuclear Science and Engineering, 100, pp342-351, 1988

표 1. 4.31w/o 및 2.35w/o UO_2 연료봉의 제원

항 목	4.31w/o 연료봉		2.35w/o 연료봉	
	길이(cm)	지름(cm)	길이(cm)	지름(cm)
UO_2 Fuel	91.44 92.71	1.265±0.0003	91.44	1.1176
Rubber End Caps	2.54	1.278	5.080	1.27
Gap(not shown)	-	1.283±0.003 OD	1.27	1.1176
Cladding(6061 Al)	96.52±0.3	1.415±0.003 OD (0.066cm thick)	93.19	1.270 OD (0.0762 thick)

표 2. 4.31w/o ^{235}U 농축도 핵연료에 대한 PNL 핵임계실험 조건

Case No.	Fuel Clusters		Absorber Plate				Critical Separation between Fuel Clusters (mm)
	No. in Array	Length x Width 25.4mm sq. Pitch	Poison Content (w/o)	Material	Thickness (mm)	Distance to Fuel Cluster (mm)	
1	1	10 x 11.51	·	·	·	·	∞
2	1	9 x 13.35	·	·	·	·	∞
3	1	8 x 16.37	·	·	·	·	∞
4	3	15 x 8	·	·	·	·	116.8
5	3	15 x 8	0	304L S/S	4.85	2.45	85.8
6	3	15 x 8	0	"	4.85	32.77	96.5
7	3	15 x 8	0	"	3.02	4.28	92.2
8	3	15 x 8	1.05	"	2.98	4.32	61.0
9	3	15 x 8	1.05	"	2.98	32.77	80.8
10	3	15 x 8	1.62	"	2.98	4.32	57.6
11	3	15 x 8	1.62	"	2.98	32.77	79.0
12	3	15 x 8	·	Boral	7.13	32.77	67.2
13	3	15 x 8	0	Copper	6.46	0.84	81.5
14	3	15 x 8	0	"	6.46	32.77	94.2
15	3	15 x 8	0	"	3.37	42.41	96.4
16	3	15 x 8	0.989	"	3.37	42.41	83.5
17	3	15 x 8	·	Cadmium	0.291	7.009	59.3
18	3	15 x 8	·	"	0.291	32.77	74.2
19	3	15 x 8	·	"	0.610	6.69	59.6
20	3	15 x 8	·	"	0.610	32.77	74.2
21	3	15 x 8	·	"	0.910	6.40	58.7
22	3	15 x 8	·	"	0.910	32.77	73.8
23	3	15 x 8	·	"	2.006	5.29	56.8
24	3	15 x 8	·	"	2.006	32.77	72.8
25	3	15 x 8	·	Al	6.25	1.05	107.2
26	3	15 x 8	·	Al	6.25	32.77	107.7
27	3	15 x 8	·	Zr-4	6.25	0.78	109.2
28	3	15 x 8	·	Zr-4	6.25	32.77	108.6

표 3. 2.35w/o ^{235}U 농축도 핵연료에 대한 PNL 핵임계실험 조건

Case No.	Fuel Clusters		Absorber Plate				Critical Separation between Fuel Clusters (mm)
	No. in Array	Length x Width 20.32mm sq. Pitch	Poison content (w/o)	Material	Thickness (mm)	Distance to Fuel Cluster (mm)	
1	1	20 x 18.08	·	·	·	·	∞
2	3	20 x 17	·	·	·	·	119.2
3	3	20 x 16	0	304L S/S	4.85	27.32	76.4
4	3	20 x 17	1.05	"	2.98	40.42	96.2
5	3	20 x 17	·	Boral	7.13	6.45	63.2
6	3	20 x 16	0	Copper	6.46	6.45	66.2
7	3	20 x 17	·	Cadmium	0.610	6.45	67.4
8	3	20 x 17	·	"	0.901	14.82	75.4
9	3	20 x 16	·	Al	6.25	6.45	86.7
10	3	20 x 16	·	Zr-4	6.52	40.42	87.8

표 4. B&W사의 CX-10 핵임계 실험로의 제원

Fuel Rod	Outer Diameter (cm)	1.206
	Clad Inner Diameter (cm)	1.044
	Clad Thickness (cm)	0.081
	Clad Material	6061-T6-Aluminium
	Pellet Diameter (cm)	1.030
	Total Length (cm)	156.44
	Active Length (cm)	153.34
	U^{235} Enrichment (w/o)	2.459
	Rod Pitch (cm)	1.636
	Pellet Density (g/cm^2)	10.29
SUS 304	Density (g/cm^2)	7.9
	Thickness (cm)	0.462
	Composition (w/o)	
	Carbon (C)	0.06
	Manganese (Mn)	1.82
	Chromium (Cr)	18.16
	Nickel (Ni)	8.59
	Molybedenum (Mo)	0.16
	Copper (Cu)	0.08
	Cobalt (Co59)	0.22
	Iron (Fe)	70.32
Aluminium 6061-T6	Density (g/cm3)	2.692
	Composition (w/o)	
	Aluminium (Al)	97.15
	Silicon (Si)	0.82
	Titanium (Ti)	0.61
	Chromium (Cr)	0.21
	Iron (Fe)	0.82
	Zircaloy (Zr)	0.12

표 5. B&W사 핵임계실험의 노심조건

Case No.	Critical Moderator Height (cm)	Moderator Boron Content (ppm)	Critical Separation between Fuel Clusters (mm)	Poison Plate/Poison Pin	
				Type	Thickness /No. of B_4C Rod
1	145	0	-	-	-
2	145	1037	-	-	-
3	145	764	1 pitch	-	-
4	145	0	1 pitch	B_4C Rod	84
5	145	0	2 pitch	-	64
6	145	0	2 pitch	-	64
7	145	0	3 pitch	-	34
8	145	0	3 pitch	-	34
9	145	0	4 pitch	-	-
10	150	143	3 pitch	-	-
11	150	514	1 pitch	SS304	0.462
12	150	217	2 pitch	SS304	0.462
13	150	15	1 pitch	1.614w/o B/Al	0.645
14	150	92	1 pitch	1.257w/o B/Al	0.645
15	150	395	1 pitch	0.401w/o B/Al	0.645
16	150	121	2 pitch	0.401w/o B/Al	0.645
17	150	487	1 pitch	0.242w/o B/Al	0.645
18	150	197	2 pitch	0.242w/o B/Al	0.645
19	150	634	1 pitch	0.100w/o B/Al	0.645
20	150	320	2 pitch	0.100w/o B/Al	0.645
21	150	72	3 pitch	0.100w/o B/Al	0.645

표 6. SCALE4.4 전산코드의 핵임계 검증계산 결과

핵임계실험		계산값($k_{eff} \pm \sigma$)	실험값(k)	$\triangle k \pm \sigma_{\triangle k}$
PNL 4.31w/o ^{235}U	CASE 1	0.99842±0.00258	1.00000	0.00158±0.00258
	CASE 2	0.99464±0.00270		0.00536±0.00270
	CASE 3	0.99365±0.00272		0.00635±0.00272
	CASE 4	0.99037±0.00291		0.00963±0.00291
	CASE 5	0.99916±0.00299		0.00084±0.00299
	CASE 6	0.99574±0.00246		0.00426±0.00246
	CASE 7	0.99547±0.00239		0.00453±0.00239
	CASE 8	0.99359±0.00237		0.00641±0.00237
	CASE 9	0.99488±0.00244		0.00512±0.00244
	CASE 10	0.99720±0.00266		0.00280±0.00266
	CASE 11	0.99321±0.00306		0.00679±0.00306
	CASE 12	0.99108±0.00260		0.00892±0.00260
	CASE 13	0.99543±0.00240		0.00457±0.00240
	CASE 14	0.99176±0.00312		0.00824±0.00312
	CASE 15	0.99997±0.00210		0.00003±0.00210
	CASE 16	0.99871±0.00260		0.00129±0.00260
	CASE 17	0.99849±0.00231		0.00151±0.00231
	CASE 18	0.99433±0.00254		0.00567±0.00254
	CASE 19	0.99639±0.00256		0.00361±0.00256
	CASE 20	0.99330±0.00234		0.00670±0.00234
	CASE 21	0.99530±0.00232		0.00470±0.00232
	CASE 22	0.99267±0.00282		0.00733±0.00282
	CASE 23	0.99822±0.00239		0.00178±0.00239
	CASE 24	0.99933±0.00283		0.00067±0.00283
	CASE 25	0.99357±0.00240		0.00643±0.00240
	CASE 26	0.99695±0.00320		0.00305±0.00320
	CASE 27	0.99768±0.00286		0.00232±0.00286
	CASE 28	0.99362±0.00269		0.00638±0.00269
PNL 2.35w/o ^{235}U	CASE 1	0.99700±0.00221	1.00000	0.00300±0.00221
	CASE 2	0.99402±0.00251		0.00598±0.00251
	CASE 3	0.99359±0.00210		0.00641±0.00210
	CASE 4	0.99004±0.00250		0.00996±0.00250
	CASE 5	0.99629±0.00257		0.00371±0.00257
	CASE 6	0.99192±0.00274		0.00808±0.00274
	CASE 7	0.99758±0.00206		0.00242±0.00206
	CASE 8	0.99238±0.00195		0.00762±0.00195
	CASE 9	0.99549±0.00285		0.00451±0.00285
	CASE 10	0.99184±0.00202		0.00861±0.00202
B&W	CASE 1	0.99251±0.00221	1.0002±0.0005	0.00769±0.00221
	CASE 2	0.99339±0.00227	1.0001±0.0005	0.00671±0.00227
	CASE 3	0.99323±0.00194	1.0000±0.0006	0.00677±0.00194
	CASE 4	0.99102±0.00284	0.9999±0.0006	0.00888±0.00284
	CASE 5	0.99006±0.00217	1.0000±0.0007	0.00994±0.00217
	CASE 6	0.99014±0.00241	1.0097±0.0012	0.01956±0.00241
	CASE 7	0.98720±0.00206	0.9998±0.0009	0.01260±0.00206
	CASE 8	0.99716±0.00261	1.0083±0.0012	0.01114±0.00261
	CASE 9	0.98999±0.00262	1.003±0.0009	0.01301±0.00262
	CASE 10	0.99217±0.00213	1.0001±0.0009	0.00793±0.00213
	CASE 11	0.99566±0.00205	1.0000±0.0006	0.00434±0.00205
	CASE 12	0.99603±0.00191	1.0000±0.0007	0.00397±0.00191
	CASE 13	0.99822±0.00228	1.0000±0.0010	0.00178±0.00228
	CASE 14	0.99268±0.00209	1.0001±0.0010	0.00742±0.00209
	CASE 15	0.98478±0.00216	0.9998±0.0016	0.01502±0.00216
	CASE 16	0.98938±0.00251	1.0001±0.0019	0.01072±0.00251
	CASE 17	0.99124±0.00181	1.0000±0.0010	0.00876±0.00181
	CASE 18	0.98912±0.00241	1.0002±0.0011	0.01108±0.00241
	CASE 19	0.99250±0.00203	1.0002±0.0010	0.00770±0.00203
	CASE 20	0.99082±0.00243	1.0003±0.0011	0.00948±0.00243
	CASE 21	0.99079±0.00222	0.9997±0.0015	0.00891±0.00222

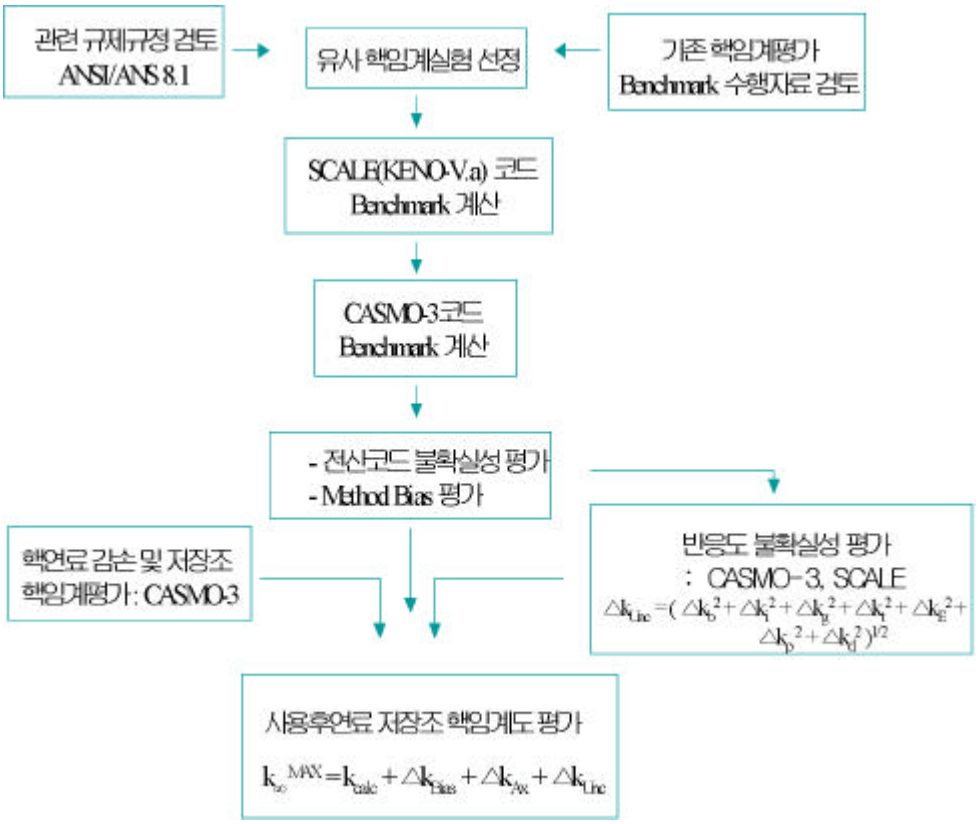

그림 1. 핵임계 전산코드 검증계산 흐름도

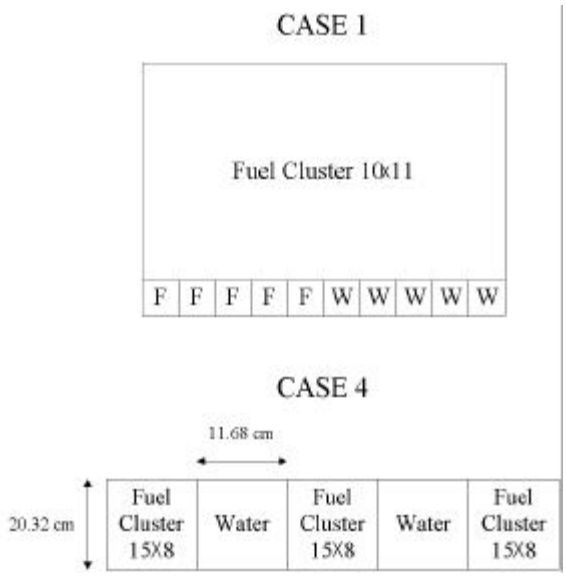

그림 2. CASE1, CASE4 핵임계실험 핵연료 배치도

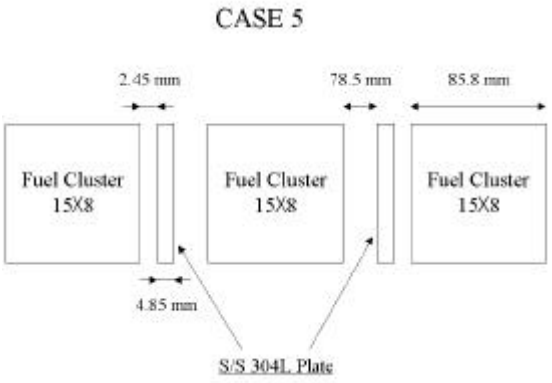

그림 3. CASE5 핵임계실험 핵연료 배치도

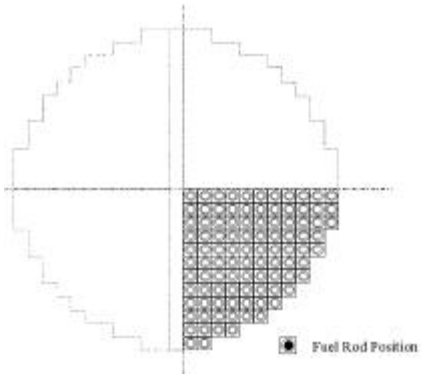

그림 4. CX-10 Core I 단면도

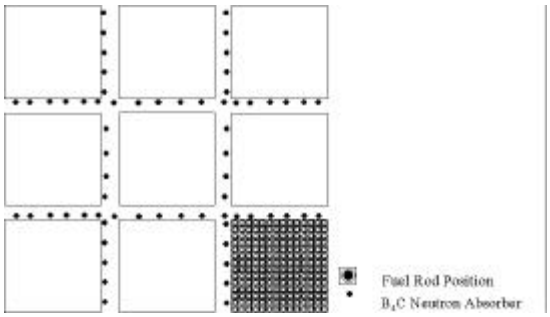

그림 5. CX-10 Core VI 단면도

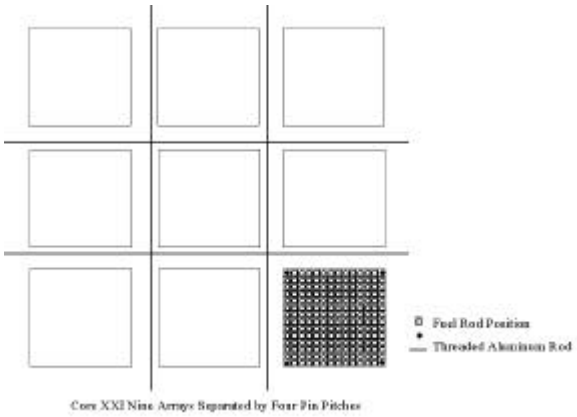

그림 6. CX-10 CoreXXI 단면도

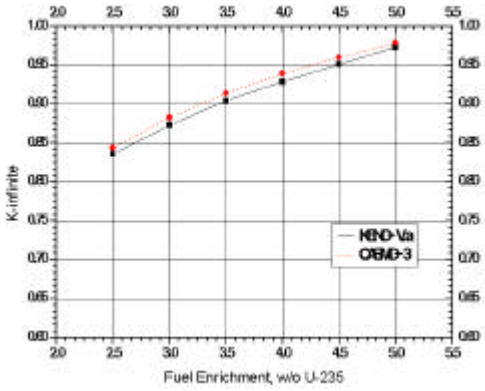

그림 7. 사용후연료저장조에 대한 KENO-V.a 와 CASNO-3 코드의 반응도평가결과 비교