



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 2월
석사학위 논문

사용후핵연료 임계도 평가를 위한
전산코드의 유효성 검증에 관한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 광 봉

사용후핵연료 임계도 평가를 위한
전산코드의 유효성 검증에 관한 연구

A Study on the Validation of Nuclear Criticality
Analysis Codes for Spent Fuel

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 광 봉

사용후핵연료 임계도 평가를 위한
전산코드의 유효성 검증에 관한 연구

지도교수 정 운 관

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 광 봉

김광봉의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	<u>송 종 순</u>	(인)
위 원	조선대학교	교수	<u>이 경 진</u>	(인)
위 원	조선대학교	교수	<u>정 운 관</u>	(인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	vii
제 1 장 서론	1
제 2 장 전산코드 입력자료 생성 및 분석	3
제 1 절 전산코드	3
제 2 절 검증방법(Validation Method)	5
1. 검증인자의 적용범위 정의	5
2. 임계실험 선정	6
가. LEU-COMP-THERM-001	7
나. LEU-COMP-THERM-002	9
다. LEU-COMP-THERM-009	11
라. LEU-COMP-THERM-013	13
마. LEU-COMP-THERM-016	14
바. LEU-COMP-THERM-017	16
사. LEU-COMP-THERM-042	17
3. 임계실험 모델링	18
제 3 절 데이터 분석	25
1. 정규성 검정	25
2. 편이 및 편이 불확실도 결정	25
3. 데이터 경향성 분석	27
4. 데이터 처리를 위한 통계분석 방법	29

가. 일방공차한계 (one-sided tolerance limit)	29
나. 공차구간 (tolerance band)	30
제 3 장 전산코드 검증결과	33
제1절 정규성 검정(Normality Test)	33
제2절 편이 및 편이 불확실도 결정	35
제3절 경향분석	42
1. SCALE 계산결과 경향 분석	42
가. 농축도	43
나. 연료봉 지름	43
다. 격자 피치	44
라. SCALE 경향분석 요약	45
2. MCNP 계산결과 경향 분석	49
3. SERPENT 계산결과 경향 분석	53
제 4 장 결론.....	59
참고문헌.....	61

표 목 차 (Table contents)

Table 2-1 Specification of U(2.35)O ₂ fuel rod I	9
Table 2-2 Specification of U(4.31)O ₂ fuel rod I	11
Table 2-3 Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-001	19
Table 2-4 Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-002	19
Table 2-5 Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-009	20
Table 2-6 Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-013	21
Table 2-7 Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-016	22
Table 2-8 Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-017	23
Table 2-9 Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-042	24
Table 3-1 Analysis data for Normality Test (1)	34
Table 3-2 Analysis data for Normality Test (2)	35
Table 3-3 Bias and Bias Uncertainty of each Code	35
Table 3-4 Calculation result of critical experiment	36
Table 3-5 Summary of Calculation result (SCALE)	42
Table 3-6 Bias and Bias uncertainty Calculation factor as a function of enrichment (SCALE)	47
Table 3-7 Bias and Bias uncertainty as a function of enrichment (SCALE)	47
Table 3-8 Bias and Bias uncertainty Calculation factor as a function of fuel diameter (SCALE)	48
Table 3-9 Bias and Bias uncertainty as a function of fuel diameter (SCALE)	48
Table 3-10 Summary of Calculation result (MCNP)	49
Table 3-11 Bias and Bias uncertainty Calculation factor as a function of enrichment (MCNP)	51
Table 3-12 Bias and Bias uncertainty as a function of enrichment (MCNP)	52
Table 3-13 Bias and Bias uncertainty Calculation factor as a function of fuel diameter (MCNP)	52
Table 3-14 Bias and Bias uncertainty as a function of fuel diameter (MCNP)	53

Table 3-15 Summary of Calculation result (SERPENT) 54

Table 3-16 Bias and Bias uncertainty Calculation factor as a function of enrichment
(SERPENT) 56

Table 3-17 Bias and Bias uncertainty as a function of enrichment (SERPENT) 57

Table 3-18 Bias and Bias uncertainty Calculation factor as a function of fuel
diameter (SERPENT) 57

Table 3-19 Bias and Bias uncertainty as a function of fuel diameter (SERPENT) .. 58

Table 4-1 Summary of Bias and Bias uncertainty as a function of enrichment 59

Table 4-2 Summary of Bias and Bias uncertainty as a function of fuel diameter .. 60

그림 목 차 (Figure contents)

Figure 2-1 A method of varying the separation distance between fuel assembly	7
Figure 2-2 Arrangement of fuel assembly for critical experiments	8
Figure 2-3 Model of U(2.35)O ₂ fuel rod I	9
Figure 2-4 Arrangement of fuel assembly for critical experiments	10
Figure 2-5 Model of U(4.31)O ₂ fuel rod I	10
Figure 2-6 Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-009 (Plane view)	12
Figure 2-7 Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-009 (Elevation View)	12
Figure 2-8 Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-013 (Plane View)	13
Figure 2-9 Model of U(4.31)O ₂ fuel rod II	14
Figure 2-10 Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-016-Case01 (Plane View)	15
Figure 2-11 Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-016-Case18 (Plane View)	15
Figure 2-12 Model of U(2.35)O ₂ fuel rod II	15
Figure 2-13 Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-017-Case01 (Plane View)	16
Figure 2-14 Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-017-Case17 (Plane View)	16
Figure 2-15 Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-042 (Plane View)	17
Figure 2-16 Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-042 (Elevation View)	18
Figure 3-1 Histogram of critical experiment result	33
Figure 3-2 Calculated Keff vs. fuel enrichment (SCALE)	43

Figure 3-3 Calculated K_{eff} vs. fuel diameter (SCALE)	44
Figure 3-4 Calculated K_{eff} vs. pin pitch (SCALE)	45
Figure 3-5 Calculated K_{eff} vs. fuel enrichment (MCNP)	50
Figure 3-6 Calculated K_{eff} vs. fuel diameter (MCNP)	50
Figure 3-7 Calculated K_{eff} vs. pin pitch (MCNP)	51
Figure 3-8 Calculated K_{eff} vs. fuel enrichment (SERPENT)	55
Figure 3-9 Calculated K_{eff} vs. fuel diameter (SERPENT)	55
Figure 3-10 Calculated K_{eff} vs. pin pitch (SERPENT)	56

ABSTRACT

A Study on the Validation of Nuclear Criticality Analysis Codes for Spent Fuel

Gwangbong Kim

Advisor : Prof. woonkwan Chung, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, Regulatory requirements for wet and dry storage of LWR fuel have been strengthened. (DSS-ISG-2010-01 Rev.0 and ISG-8 Rev.3)

Thus, the critical experiments and validation of burnable nuclide in Criticality Evaluation has increased in importance.

This study shows the result of validation test for KENO-Va, MCNP-X code that is often used for criticality evaluation and for SERPENT code which was developed in Finland in 2004 and widely used in Europe recently.

To determine the suitability of the test results for enhanced regulatory requirements, the statistical analysis and validation of three codes were carried out in accordance with NUREG / CR-6698 respectively.

Critical safety analysis target to be considered in this calculation is the validation for the light-water reactor spent fuel storage facilities.

Accordingly, criticality experiments using UO_2 fuel rods constituting the assembly form and using water as a moderator were selected to demonstrate the validity of the analysis method.

Total 7 group(01, 02, 09, 13, 16, 17, 42) 115 experiment data that satisfies these conditions was selected from the Handbook Volume -IV "low enriched uranium systems (LEU-COMP- THERM-0XX)" which has been published by ICSBEP as OECD / NEA documents.

Data analysis was carried out for statistical analysis and validation according to NUREG / CR-6698.

In addition, the Student t-test was used to determine statistical significance of the input data.

If the relationship can be determined between the calculated k_{eff} and the independent variables, the one-sided tolerance band can be used.

Bias and bias uncertainty of one-sided tolerance band for the criticality experiment is expressed as follows.

$$bias = \begin{cases} K_{fit} - 1.0 & : K_{fit} < 1.0 \\ 0.0 & : K_{fit} \geq 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

$$bias\ uncertainty = S_{P_{fit}} \left\{ \sqrt{2F_a^{(2,n-2)} \left[\frac{1}{n} + \frac{(x-\bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right]} + z_{2P-1} \sqrt{\frac{(n-2)}{\chi_{1-\gamma, n-2}^2}} \right\} \quad (4)$$

Validation results of the three codes are shown in Table II .

Table I. Trend Result using t-score (SERPENT)

	U ²³⁵ Enrichment	Pin pitch	Fuel diameter
t-score	2.4281	-0.9879	2.4281
Student-t Compare Value	± 1.9812	± 1.9812	± 1.9812
Result	Statistically Significant	Not Statistically Significant	Statistically Significant

Table II. Best Estimated Bias and Bias Uncertainty

Code	bias and bias uncertainty
KENO-Va	-0.0021 ± 0.0028
MCNP-X	-0.0046 ± 0.0027
SERPENT	-0.0009 ± 0.0027

Applying the one-sided tolerance band for the fuel enrichment and diameter to criticality evaluation we can calculate the optimal k_{eff} which satisfies the USL in criticality evaluation.

Based on bias and bias uncertainty evaluation results for the three codes , we can find the best estimated bias of the SERPENT code is lowest.

제 1 장 서론

국내에 설치되어 운전 중이거나 건설 중인 원자력발전소는 크게 두 가지 형태로써 가압경수로와 가압중수로이다. 월성에 설치되어 운전 중인 4기의 가압중수로형은 천연 우라늄 연료를 사용하며 그 외 모든 가압경수로형 원전은 약 5% 정도의 저농축우라늄 연료를 사용한다.

모든 원전에서 원자료를 제외한 연료저장 구역에서 임계도달을 허용하지 않는다. 원자료에서 연소를 마치고 방출된 연료는 사용후연료저장조에 이동 저장하는데 가압경수로의 경우 냉각수로 채워진 수조에 저장하게 된다. 일반적으로 사용후연료저장조는 저장랙에 사용후연료가 완전히 채워진 조건에서도 미임계상태($K_{eff} \leq 0.95$)가 유지되도록 설계되었다. 국내 가압경수형 원전은 건설당시 소외 중간저장, 재처리 및 영구처분을 고려하여 단기간 동안 저장할 수 있도록 사용후연료저장조와 저장랙을 설계 및 건설, 운영해왔다. 그러나 소외 중간저장시설 건설이 지연되고 재처리 또는 영구처분도 하지 못함으로써 장기간 운전에 따른 사용후연료의 누적에 의해 저장조가 포화상태에 이르게 되었으며 단기적 해소방안으로 기존의 저장조에 보다 많은 연료를 저장하기 위한 조밀랙을 설치하였거나 설치를 진행 중에 있으며 추가적인 조치로 사용후연료수송 용기에 담아 소내에 저장하는 것을 추진하고 있다. 어떠한 경우든 원자료를 제외하고는 임계를 허용하지 않는다.

따라서 핵연료의 저장조건에 따른 임계제한조건을 만족하는지 임계도 평가를 시행하여야한다. 또한, 임계제한조건 만족여부를 평가하는데 사용하는 임계해석코드에 대한 유효성 확인 즉, 임계도 평가 전산코드의 검증이 선행되어야한다. 이를 위해 NRC 지침인 “Guide for Validation of Nuclear Criticality Safety Calculational Methodology (NUREG/CR-6698)” (참고문헌 1)에 따라 임계도 계산 시 발생하는 편이(Bias) 및 불확실도(Uncertainty)를 구하고 통계적 분석 및 유효성 검증을 수행하였다. 임계실험 모델링에 사용된 입력 자료의 통계적 유의성을 판단하기 위하여 NRC가 제공한 통계 가이드북(참고문헌 2)에 제시된 회귀분석 방법에 따라 수행하였다. 유효성 검증에 사용된 Monte Carlo 전산코드는 지금까지 전 세계적으로 임계도 평가에 널리 사용되고 있는 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)의 SCALE6.1(참고문헌 3) 코드체계에 포함된 KENO-V.a 코드 및 LANL(Los Alamos National Laboratory)의 MCNP6.1(참고문헌

4) 코드와 핀란드의 VTT Technical Research Centre에서 개발된 SERPENT 코드(참고문헌 5) 등 세 가지 Monte Carlo 코드를 이용하여 유효성 검증을 수행하였다. 전산 코드의 유효성검증에 사용된 임계실험 모델링은 OECD/NEA가 제공하는 “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”(참고문헌 6)에 수록된 임계실험 중 국내 가압경수로용 핵연료 검증에 적합한 정방형 (square-pitched) UO_2 연료집합체로 설계된 115개 실험을 대상으로 수행하였으며 계산 결과로부터 임계도 평가에 적용할 전산코드의 유효성을 확인하였다.

제 2 장 전산코드 입력자료 생성 및 분석

제 1 절 전산코드

SCALE6.1 코드체계, MCNP 코드 및 SERPENT 코드를 이용하여 임계실험 문제에 대한 검증계산을 수행하였으며, 계산결과를 토대로 Bias 및 계산 방법상의 불확실도를 평가하였다.

SCALE6.1 코드체계는 임계안전해석, 방사선원항 계산 및 연소계산, 차폐계산 등을 수행할 수 있는 여러 종류의 모듈로 구성되어 있다. 이러한 여러 계산 모듈 중에서 CSAS(Criticality Safety Analysis Sequence) 모듈을 이용하여 임계도 평가를 수행하였으며 사용된 중성자 단면적 라이브러리는 ENDF/B-VII로부터 생성된 238그룹 핵단면적 자료(V7-238)이다. CSAS 모듈 중 임계해석에 주로 사용되는 모듈은 CSAS5 또는 CSAS6 모듈이며, 이 모듈은 BONAMI, CENTRM, WORKER 및 PMC 등의 코드를 이용하여 다군(Multigroup) 핵단면적을 처리하여 적절한 공명 핵단면적 보정값(resonance corrections)을 군평균(group-average) 핵단면적에 제공하며, 이를 이용하여 KENO V.a 또는 KENO-VI 코드는 Monte Carlo 방법으로 유효증배계수(Keff)를 계산한다.

MCNP(Monte Carlo N - Particle Transport Code System, Version 6.1, and Data Libraries) 코드는 임계문제의 고유치 계산 및 중성자, 광자, 전자 또는 이들의 연계계산의 수송문제에 사용되어진다. 그리고 임의의 기하학적 형태를 나타낼 수 있는 Surface 카드와 이를 이용한 Cell 카드를 이용하여 복잡한 3차원 문제를 쉽게 구현할 수 있다는 특징이 있다. 라이브러리는 사용자의 목적에 따라서 Pointwise 또는 Continuous Cross-Section을 사용할 수 있다. MCNP 코드의 또 다른 특징으로는 사용자의 목적에 따라서 선원항을 자유롭게 정의할 수 있으며 Tally 카드를 이용하여 원하는 정보를 얻을 수 있다. 그리고 분산감쇄기법(Variance Reduction Technique)을 이용하여 계산시간의 단축 및 효율적인 계산결과를 얻을 수 있다는 특징을 가진다.

SERPENT 코드는 2004년부터 VTT Technical Research Centre에서 개발되어 온 노심 분석용 삼차원 연속에너지 몬테칼로(Monte Carlo) 코드이다. SERPENT의 적용 분야는 다음과 같다.

- 결정론적 노심 시뮬레이터 계산에 의한 공간 균질화 및 균정수 생산
- 세부적인 집합체 단위의 연소계산을 통한 핵주기 연구
- 결정론적 격자해석 수송 코드의 검증
- 연구용 원자로, 소형 모듈 원자로의 전 노심 모사
- 노심의 물리적 현상의 설명과 교육

Monte Carlo 방법론을 이용한 임계도 계산의 적절성 여부는 다음의 인자들과 밀접한 관계가 있으며, 각각의 코드 입력에 사용된 내용은 다음과 같다.

number of neutrons per generation : 6000

number of generations to be omitted when collecting results : 50

number of generations to be run : 2000

initial source distribution : 연료영역에 일정하게 분포

제2절 검증방법 (Validation Method)

임계도 평가를 위한 Monte Carlo 코드의 검증은 NRC 지침에 기술된 방법론에 따라 수행하였다. 검증에서는 임계실험 유효증배계수의 계산값과 측정값 차이, 즉 편이(bias)를 정량화하는 것이다. 임계실험 검증계산 시 발생하는 편이와 편이 불확실도는 규제요건을 만족하기 위하여, 실제 평가하고자 하는 계통(또는 시설)의 임계도 계산 시 발생하는 여타 편이 및 불확실도 뿐만 아니라 추가로 발생하는 미임계 여유도(sub-critical margin) 등과 함께 종합적으로 다루어져야 한다.(참고문헌 7,8)

편이에 존재하는 경향(trend)을 결정하기 위하여 통계적인 분석이 수행된다. 검증에 사용되는 임계실험의 각 인자들[예; 농축도, 연료봉 지름, pin pitch, EALF(Energy of Average Lethargy of Fission) 등]은 계통(또는 시설)의 임계도 평가가 가능한 수준의 값으로 설정하는, 이른바 적용범위(Area of applicability)를 정의해야 한다.

NRC 지침에 기술된 바와 같이 검증에 사용된 방법은 다음과 같다.

1. 검증인자의 적용범위 정의
2. 임계실험 선정
3. 임계실험 모델링
4. 데이터 분석
 - 정규분포 시험 (Test for Normality)
 - 편이 및 편이 불확실도 결정
 - 데이터 경향성 분석 (편이의 경향성 산정 방법론 포함)

1. 검증인자의 적용범위 정의

NRC 지침은 다음과 같이 유효성 검증에 앞서 검증되어야 할 변수들이 적용되는 운영범위를 확인할 것을 규정하고 있다.

“검증에 앞서 유효성 검사가 적용되는 조건 및 인자들이 규정되어야 한다. 핵분열 물질, 핵분열 물질의 농축도, 연료밀도, 연료의 화학적 구성, 중성자 감속재와 반사체의 형태, 핵분열 물질에 대한 감속재 영역, 중성자 흡수제, 물리적 구성 등이 규정되어야 할 인자들에 속한다. 즉, 이들 인자들은 검증계산에 대한 적용범위가 정의되어야 할 것이다.”

이 유효성 검사는 상업용 가압경수로 연료 저장랙을 위한 것이다. 저장랙은 실온 및 100℃ 미만에서 침수되고 있다고 가정한다. 연료는 저농축 UO_2 (U^{235} 의 5.0w/o 및 그 이하)이다. 연료밀도는 94% 이론 밀도보다 높다. 유일한 중성자 감속재는 물 및 연료 펠렛 내 산소다. 임계도 이득에 영향 있는 중성자 흡수재는 붕소(판, 봉 또는 용액 내 존재) 및 은-인듐-카드뮴 제어봉이다. 반사체는 물, 철 또는 콘크리트다. 집합체 배열은 완전히 고립된 집합체부터 조밀한 집합체 배열까지 디자인에 따라 다양하다.

2. 임계실험 선정

검증계산의 대상으로 선정되는 임계실험은 실제 임계안전을 평가하려고 하는 대상의 특성을 잘 반영하여야 한다. 이 검증계산에 고려되는 임계안전해석 대상은 경수로용 연료 저장시설이다. 이에 따라 해석 방법의 타당성을 입증하기 위하여 UO_2 연료봉이 집합체 형태를 구성하고 있으며 감속재로 물을 사용하는 임계실험을 검증대상으로 설정하고, ICSBEP (International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project)가 OECD/NEA 문서로 발간한 “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments” 중에서 이러한 조건을 만족하는 임계실험을 선정하였다. 이 핸드북은 전 세계적으로 수행된 여러 종류의 임계실험에서 얻어진 핵임계 안전 검증자료를 포함하고 있는데, 이 자료는 임계계산의 타당성을 입증하는데 사용될 목적으로 정리된 것이다.

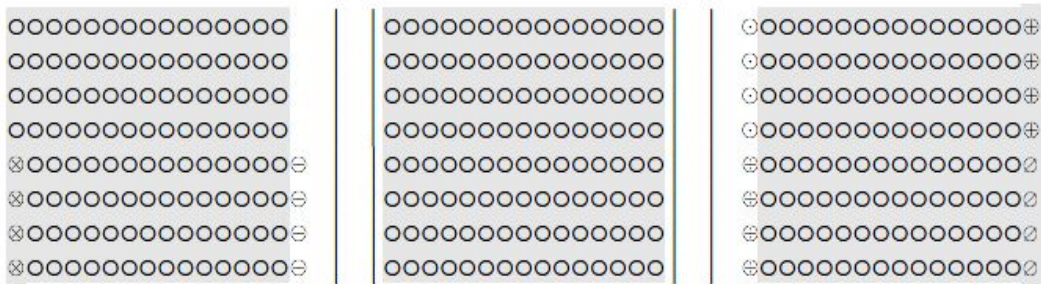
또한, 유효성 검사에 사용되는 실험 전부는 핸드북의 볼륨IV “저농축 우라늄 시스템” 으로부터 가져왔으며, 선택된 실험 전체는 LEU-COMP-THERM-OXX와 같이 번호화 되어 있다. 다만, 검증계산을 위한 모델링의 모든 입력 및 출력은 “lctXX.”로 요약하였다.

7개 종류의 임계실험 자료에서 모두 115개의 개별 임계실험을 선정하였으며, 선정된 임계실험 제목과 각각의 내용은 다음과 같다.

가. LEU-COMP-THERM-001

(Water-Moderated U(2.35)O₂ , Fuel Rods in 2.032cm Square-Pitched Arrays)

1.8 x 3.0 x 2.1m 크기의 Carbon Steel 탱크(두께=9.52mm)안에 반사체인 물로 둘러싸인 직사각형 형태의 연료집합체가 들어있다. 연료집합체의 크기는 실험 Case에 따라 다르고 연료집합체 안에는 연료봉이 정방형 격자 구조형태로 배열되어 있으며, 연료봉간의 피치는 2.032cm이다. 연료집합체의 개수, 연료집합체 사이의 거리와 연료집합체 안의 연료봉의 배열 및 개수를 변화시키면서 8가지 경우에 대해서 임계실험이 이루어졌다. 연료 농축도 2.35w/o UO₂ 를 사용하였다.



| | are safety and control blade guide widths

Initial load is shaded.

⊕ → ⊙ first move (1³/₄)^(a)

⊗ → ⊖ second move (1¹/₂)^(a)

∅ → ⊖ third move (1¹/₄)^(a)

(a) 연료봉 이동 이후의 측면과 중앙 연료집합체 사이의 분리된 간격을 나타낸다. 분리 거리는 {[평균 분리열] x [격자피치]} + [안내 제어 날개의 폭] 으로 나타 낼 수 있다.

Figure 2-1. A method of varying the separation distance between fuel assembly

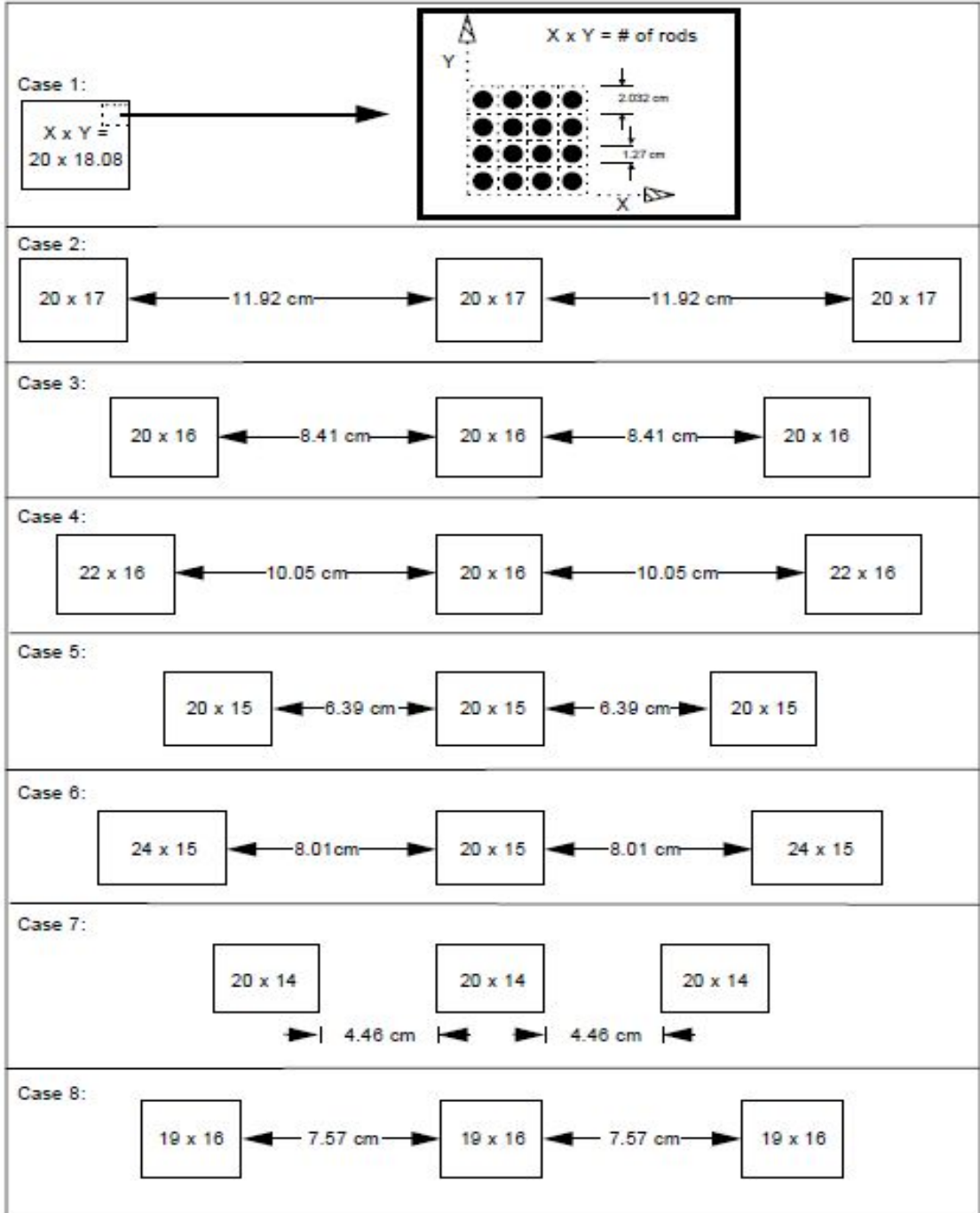


Figure 2-2. Arrangement of fuel assemblies for critical experiments

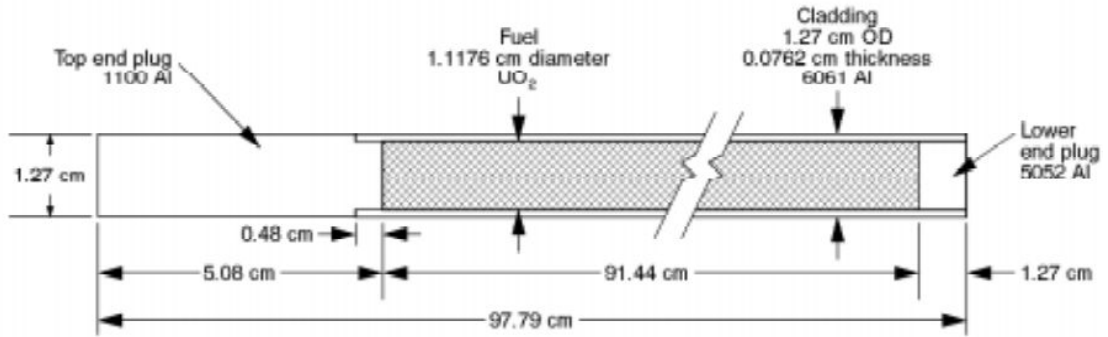


Figure 2-3. Model of U(2.35)O₂ fuel rod I

Table 2-1. Specification of U(2.35)O₂ fuel rod I

Component	Length (cm)	Diameter (cm)
UO ₂ Fuel (2.35w/o enriched)	91.44	1.1176
Top end plug (1100 Al)	5.080	1.27
Lower end plug (5052 Al)	1.27	1.1176
Clad (6061 Al)	~93.19	1.270 OD (두께: 0.762cm)

나. LEU-COMP-THERM-002

(Water-Moderated U(4.31)O₂ , Fuel Rods in 2.54cm Square-Pitched Arrays)

이 실험은 LEU-COMP-THERM-001 실험과 유사하며 반사체인 물로 채워진 1.8 x 3.0 x 2.1m, 두께가 9.52mm인 Carbon Steel 탱크 안에 직사각형 형태의 연료집합체가 들어있다. 연료집합체는 정방형 격자 구조형태로 연료봉이 배열되어 있으며, 연료봉 간의 피치는 2.54cm이다. 연료집합체의 크기는 실험 내용에 따라 10 x 11.51, 15 x 8, 13 x 8 등이 사용되었으며 연료집합체 사이의 거리와 개수를 실험에 따라 변화시키면서 5가지 경우에 대해서 임계실험이 이루어졌다. 연료 농축도 4.31w/o UO₂ 를 사용하였다.

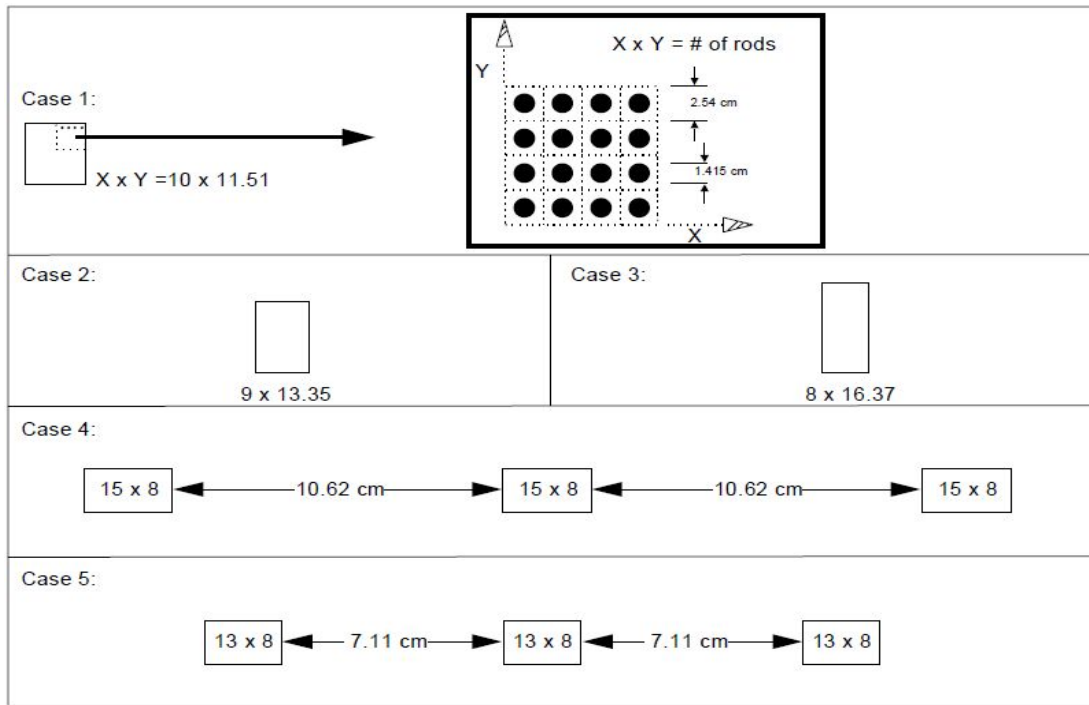


Figure 2-4. Arrangement of fuel assemblies for critical experiments

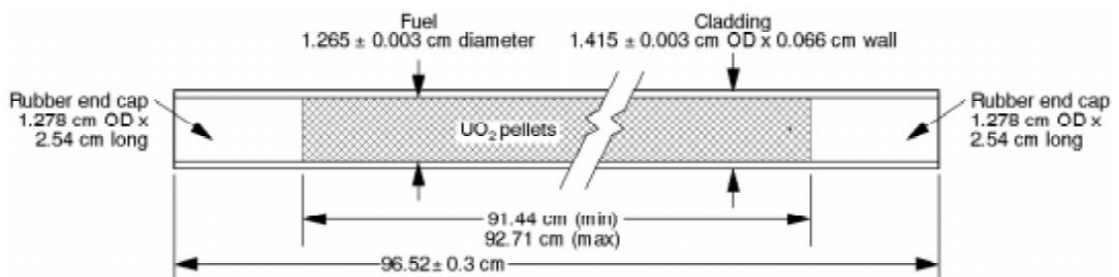


Figure 2-5. Model of $U(4.31)O_2$ fuel rod I

Table 2-2. Specification of U(4.31)O₂ fuel rod I

Component	Length (cm)	Diameter (cm)
UO ₂ Fuel (4.31w/o enriched)	91.44 ~ 92.71	1.26 ± 0.003
Rubber End Caps	2.54	1.278
Gap (Not shown)	-	1.283 ± 0.003 OD
Clad (6061 Al)	96.52 ± 0.3	1.415 ± 0.003 OD (두께: 0.060cm)

다. LEU-COMP-THERM-009

(Water-Moderated Rectangular Clusters of U(4.31)O₂ Fuel Rods (2.54cm Pitch)
 Separated by Steel, Boral, Copper, Cadmium, Aluminum or Zircaloy-4 Plates)

3개의 직사각형 형태의 연료집합체가 반사체인 물로 둘러싸인 형태이고 집합체사이에 두 개의 흡수체가 삽입되어 있다. 이 흡수체의 재질은 Stainless Steel, Boral, Copper, Cadmium, Aluminum, Zircaloy 이다. 그리고 흡수체의 재질 및 가운데 집합체의 바깥쪽으로부터 흡수체까지의 거리를 변화시키면서 29개 경우에 대해서 임계실험이 이루어 졌다. 실제로 이들 집합체와 흡수체는 1.8 × 3.0 × 2.1m, 두께가 9.52mm인 Carbon Steel 탱크 안에 들어있다.

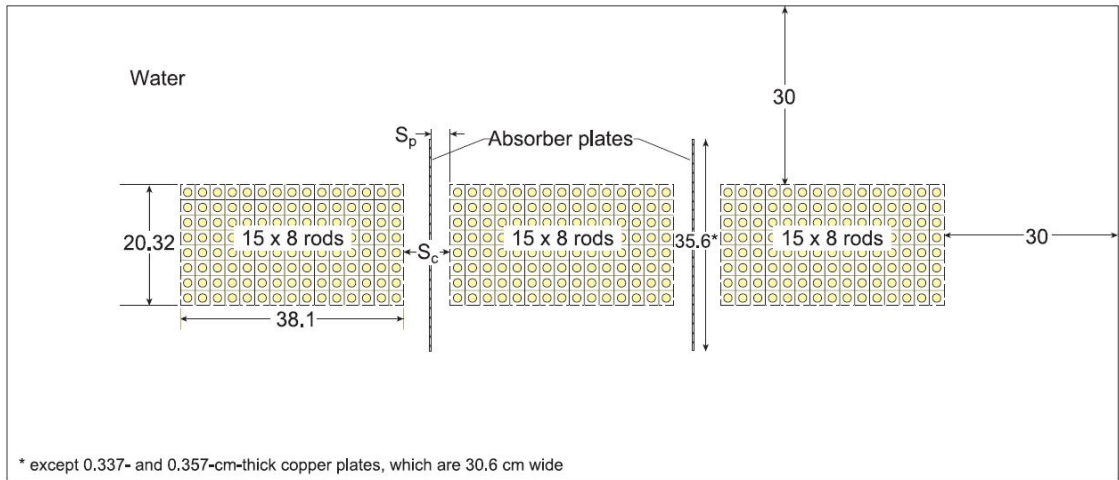


Figure 2-6. Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-009 (plane view)

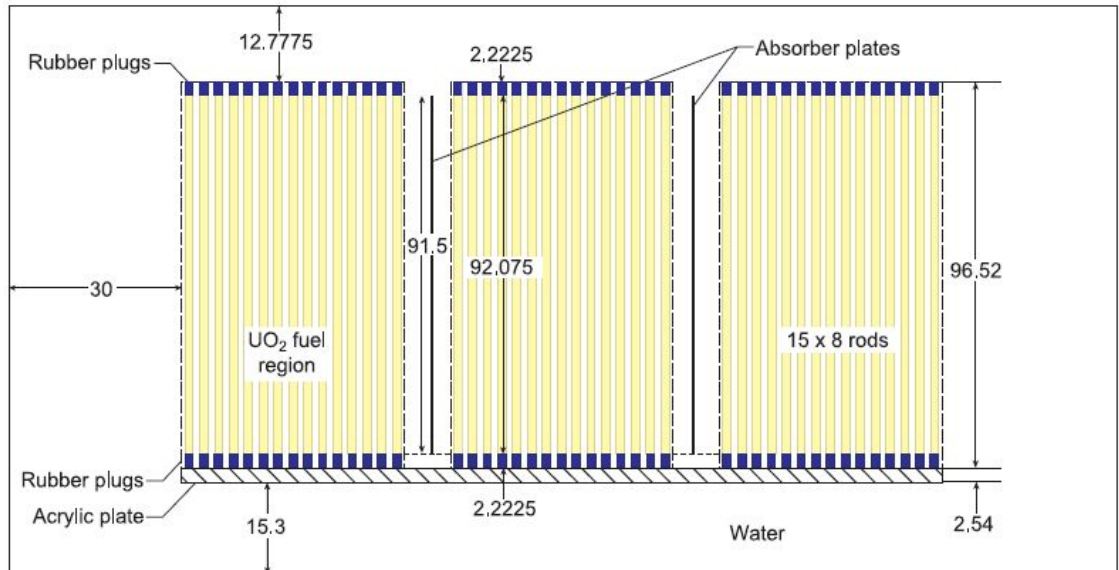


Figure 2-7. Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-009 (Elevation View)

라. LEU-COMP-THERM-013

(Water-Moderated Rectangular Clusters of $U(4.31)O_2$ Fuel Rods (1.892cm Pitch) Separated by Steel, Boral, Boraflex, Cadmium, or Copper Plates, With Steel Reflecting Walls)

Carbon-steel 탱크(두께:0.952cm)안에 반사체 역할을 하는 물로 둘러싸인 연료집합체가 들어있다. 물의 높이는 연료봉 위 최소 15cm 이상이며 최소 두께는 30.5cm이다 (steel 반사벽 두께 포함). 연료집합체의 크기는 12 x 16이며 연료봉 사이의 pitch는 1.892cm이다. 중심 연료집합체 양 옆면에는 흡수판이 부착되어 있으며 흡수판의 재질은 Steel, Boral, Boraflex, Cadmium과 Copper이다. 흡수판의 재질 및 두께, 연료집합체 사이의 거리를 변화시키면서 7가지 경우에 대해서 임계실험을 하였다. 농축도 4.31 w/o UO_2 를 사용하였다.

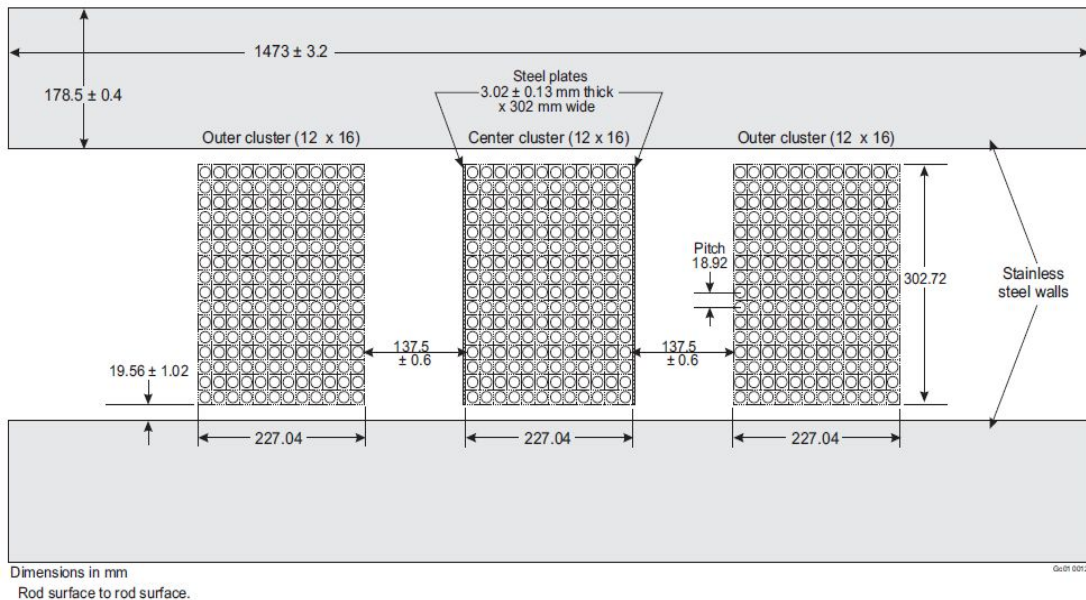
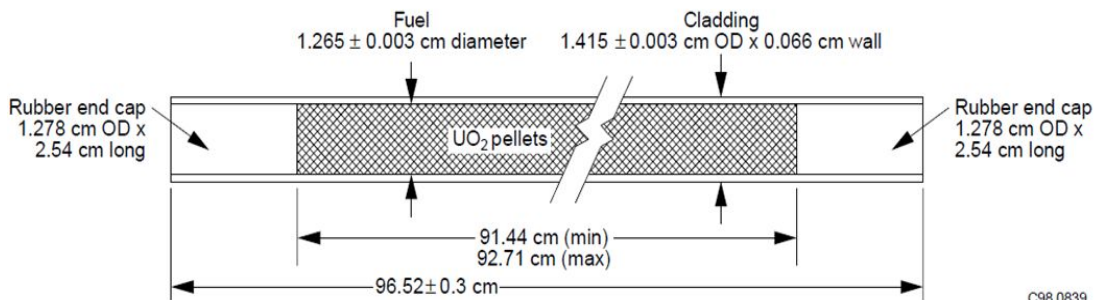


Figure 2-8. Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-013 (plane View)



C98 0839

Figure 2-9. Model of U(4.31)O₂ fuel rod II

마. LEU-COMP-THERM-016

(Water-Moderated Rectangular Clusters of U(2.35)O₂ Fuel Rods (2.032cm Pitch) Separated by Steel, Boral, Copper, Cadmium, Aluminium or Zircaloy-4 Plates)

이 실험은 LEU-COMP-THERM-009와 유사하게 3개의 집합체가 물로 채워진 Carbon Steel 탱크 안에 있고 두 개의 흡수관이 집합체 사이에 있는 형태이다. 연료봉은 정방형 격자 구조형태로 배열되어 있으며, 연료봉간의 피치는 2.032cm이다. 연료집합체의 크기는 20×16, 20×17, 22×16 등으로 실험에 따라 조금씩 다르며 이 집합체가 1×3으로 배열되어 있다. 배열된 연료집합체의 사이에 중성자 흡수관이 놓이는데 사용된 중성자 흡수체의 재질은 Stainless Steel, 붕소함유 Stainless Steel, Boral, Copper, Cadmium, Aluminium, Zircaloy-4 등이다.

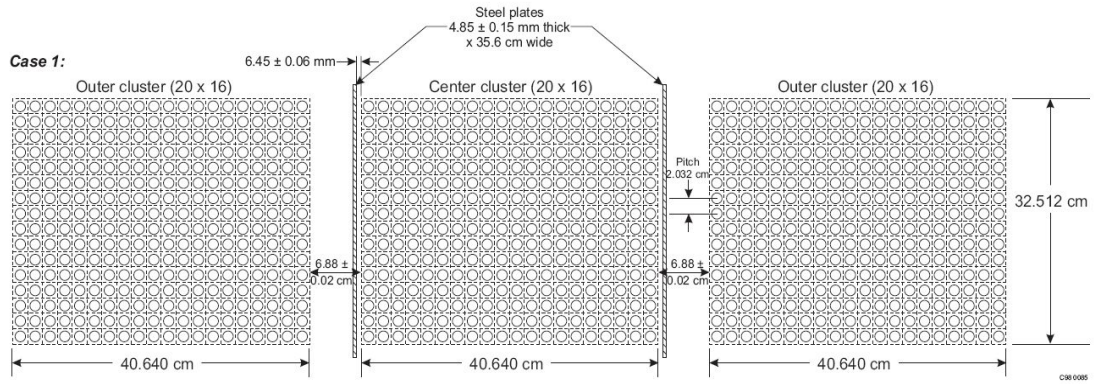


Figure 2-10. Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-016-Case01 (plane View)

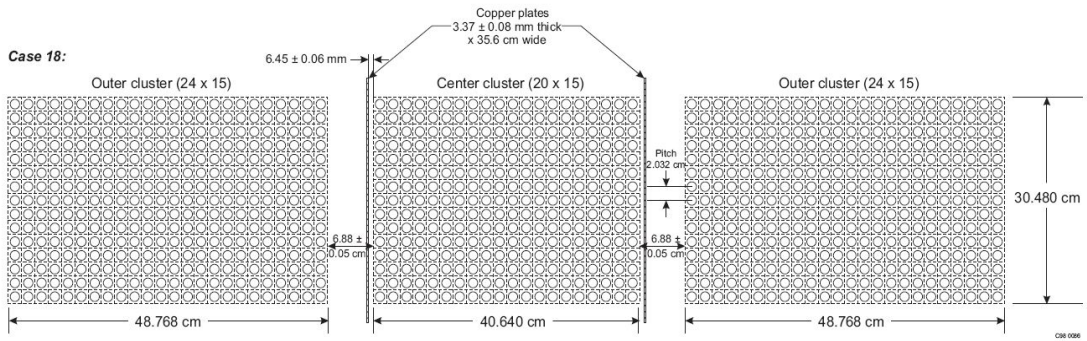


Figure 2-11. Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-016-Case18 (plane View)

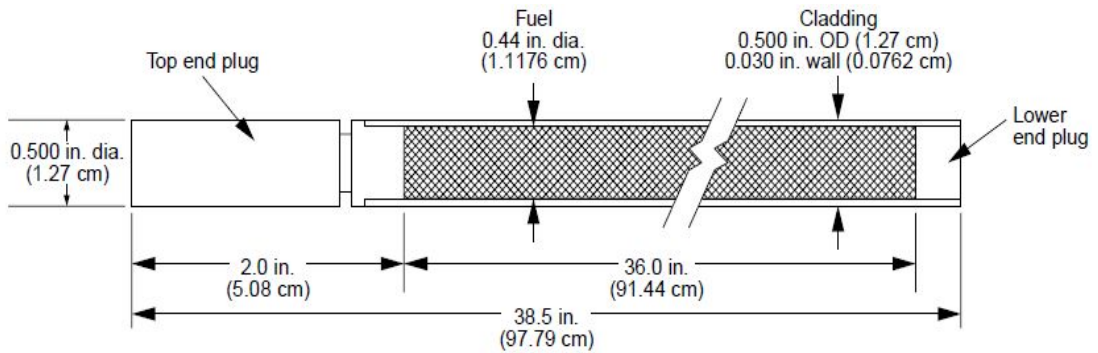


Figure 2-12. Model of $U(2.35)O_2$ fuel rod II

바. LEU-COMP-THERM-017

(Water-Moderated $U(2.35)O_2$ Fuel Rods Reflected by Two Lead, Uranium or Steel Walls)

이 실험은 LEU-COMP-THERM-010과 유사하며 물로 채워진 0.952cm 두께의 Carbon Steel 탱크 안에 알루미늄 피복재의 연료봉으로 3개의 집합체를 구성하여 실험이 수행되었다. 연료봉은 정방형 격자 구조형태로 배열되어 있으며, 연료봉간의 피치는 2.032cm 및 1.684cm이고 연료집합체의 크기는 19×16, 25×18, 20×18 등으로 실험에 따라 조금씩 다르며 이 집합체가 1×3으로 배열되어 있다. 배열된 연료집합체의 양방향에 Stainless Steel, Lead, Depleted Uranium 등의 반사체가 놓여 있다.

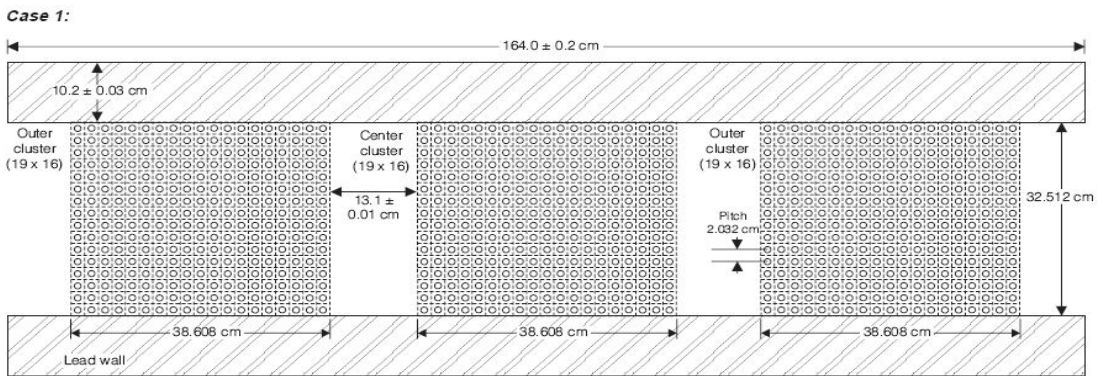


Figure 2-13. Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-017-Case01 (plane view)

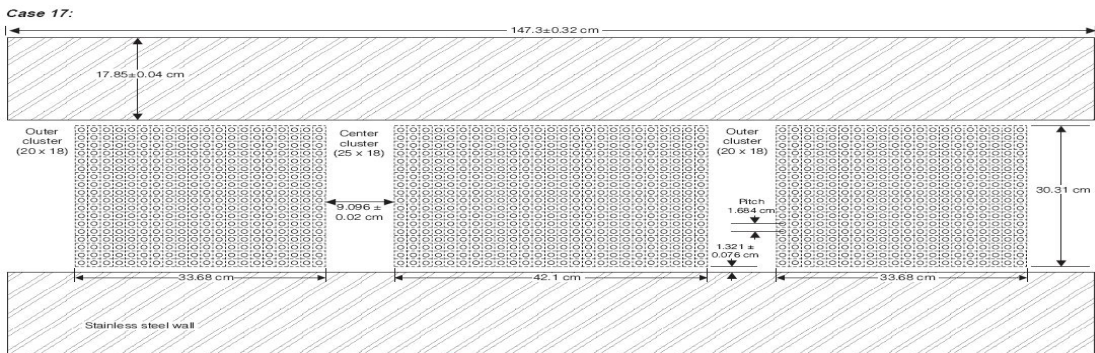


Figure 2-14. Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-017-Case17 (plane view)

사. LEU-COMP-THERM-042

(Water-Moderated Rectangular Clusters of U(2.35)O₂ Fuel Rods (1.684cm Pitch) Separated by Steel, Boral, Boraflex, Cadmium, or Copper Plates, with Steel Reflecting Walls)

Carbon-steel 탱크(탱크에 대한 치수는 없음) 안에 3개의 직사각형 형태의 연료집합체가 반사체인 물로 둘러싸인 형태이고 중간 연료집합체 양옆 경계면에 연료봉과 평행하게 흡수체가 삽입되어 있다. 바깥쪽 연료집합체의 크기는 20 x 18이며 중앙 연료집합체의 크기는 25 x 18이다. 흡수체의 재질은 304L steel, 304L steel(1.1% B), Boral, Boraflex, cadmium, copper, copper-cadmium이다. 반사체의 재질 및 두께와 연료집합체 사이의 거리의 변화시키면서 7가지 경우에 대해서 임계실험이 이루어졌다. 연료봉 사이의 pitch는 1.684cm 이고 농축도 2.35w/o UO₂ 를 사용하였으며 1번 실험의 연료 모델링과 동일하다.

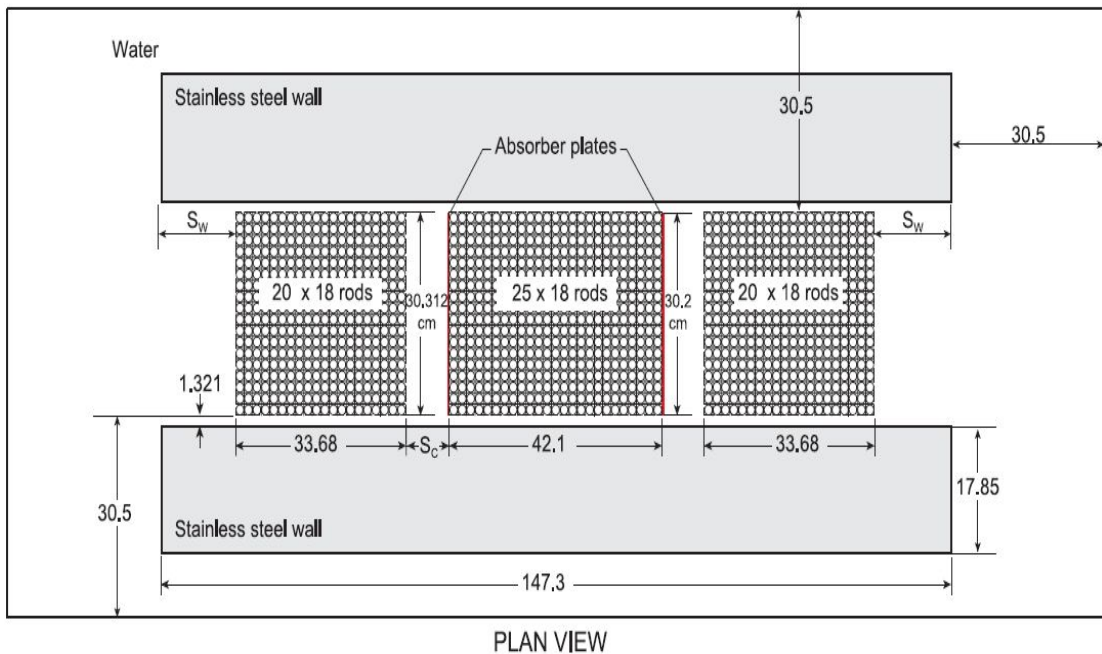


Figure 2-15. Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-042 (plane View)

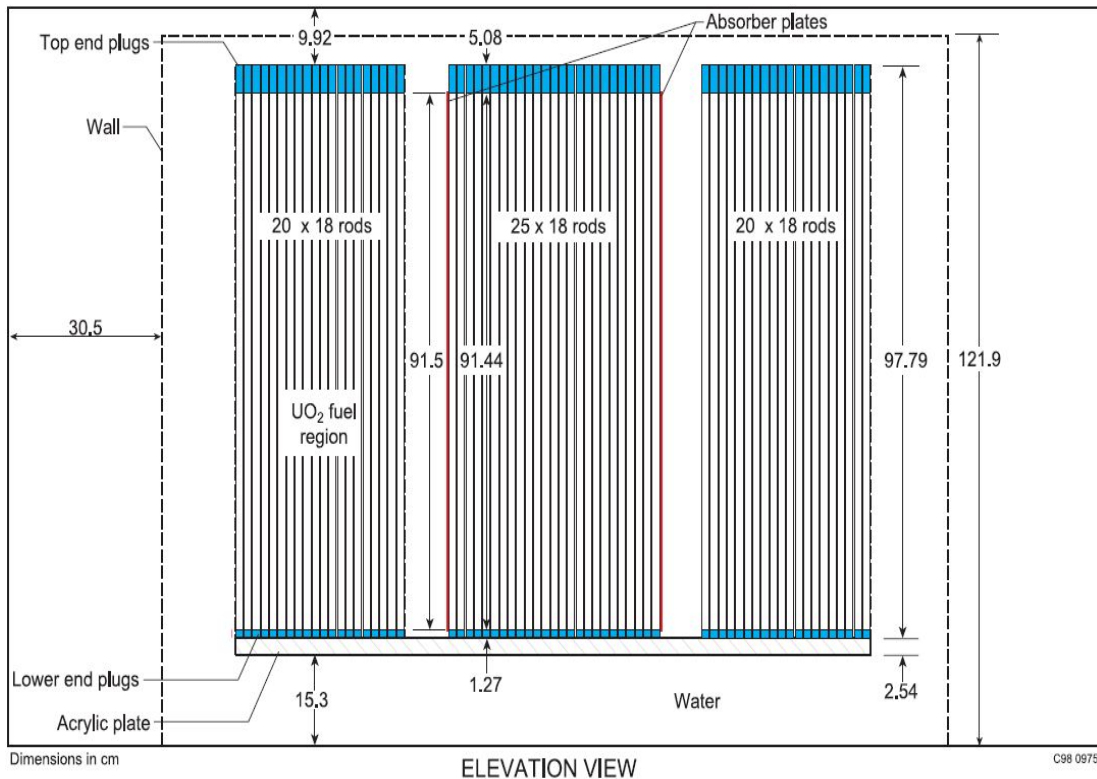


Figure 2-16. Assembly arrangement for experiment LEU-COMP-THERM-042 (Elevation View)

3. 임계실험 모델링

임계실험 모델링을 위한 SCALE 입력은 핸드북(참고문헌 3)에 기술되어 있지만, 일부 수정하였다. 핸드북에 기술된 SCALE 입력의 반응수와 반응 당 중성자의 개수는 일반적으로 너무 낮아 검증에 사용되는 115개 입력파일은 반응 당 6,000개 중성자 및 2000개의 반응으로 수정되었다. 입력파일은 핸드북에 주어진 동위원소 내용과 일치함을 확인하였으며, 기하학적 모델링도 핸드북 설명과 일치함을 확인하였고, 각 임계실험 해석을 위한 입력 자료는 Table 2-3부터 2-9와 같다.

Table 2-3. Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-001

Case No.	Number of Clusters	Cluster Dimensions (X x Y) ^(a)			Separation Between Clusters(cm)
		X-1	X-2	Y	
1	1	20	20	18.08	-
2	3	20	20	17	11.92
3	3	20	20	16	8.41 ^(b)
4	3	22	20	16	10.05
5	3	20	20	15	6.39
6	3	24	20	15	8.01
7	3	20	20	14	4.46
8	3	19	19	16	7.57

(a) X-1: 바깥쪽 연료집합체, X-2: 중심 연료집합체

(b) 평균값 (8.39, 8.41, 8.42, and 8.44 cm \pm 0.05 cm)

Table 2-4. Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-002

Case Number	Number of Clusters	Cluster Dimensions (number of rods, X x Y)	Separation Between Clusters (cm)
1	1	10 x 11.51	-
2	1	9 x 13.35	-
3	1	8 x 16.37	-
4	3	15 x 8	10.62 ^(a)
5	3	13 x 8	7.11 ^(b)

(a) 두 값의 평균값 (10.64 cm, 10.60 cm) (연료봉 표면에서 표면사이의 거리)

(b) 두 값의 평균값 (8.24 and 8.23 \pm 0.3 cm), 분리 거리는 연료봉 표면에서 표면까지 거리이다 (Sid Bierman, private communication, July 1993), 셀 경계 분리거리는 (연료봉 표면사이 거리) - (격자 피치) + (연료봉 지름) = 8.235 - 2.54 + 1.415 = 7.11 cm.

Table 2-5. Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-009

Case No.	Type of Plate	Plate Thickness (cm)	Distance from Plate to Center Cluster, S_p (cm)	Separation of Clusters, S_c (cm)
1	steel (no B)	0.485	0.245	8.58
2	steel (no B)	0.485	3.277	9.65
3	steel (no B)	0.302	0.428	9.22
4	steel (no B)	0.302	3.277	9.76
5	steel (1.1%B)	0.298	0.432	6.10
6	steel (1.1%B)	0.298	3.277	8.08
7	steel (1.6%B)	0.298	0.432	5.76
8	steel (1.6%B)	0.298	3.277	7.90
9	Boral	0.713 ¹⁾	3.277	6.72
10	copper (no Cd)	0.646	0.084	8.15
11	copper (no Cd)	0.646	3.277	9.42
12	copper (no Cd)	0.337 ²⁾	-0.0575 ³⁾	8.48
13	copper (no Cd)	0.337 ²⁾	4.241	9.64
14	copper (1% Cd)	0.357 ²⁾	-0.0575 ³⁾	6.66
15	copper (1% Cd)	0.357 ²⁾	4.241	8.35
16	cadmium	0.0291	0.7009	5.93
17	cadmium	0.0291	3.277	7.42
18	cadmium	0.061	0.669	5.96
19	cadmium	0.061	3.277	7.42
20	cadmium	0.0901	0.64	5.87
21	cadmium	0.0901	3.277	7.38
22	cadmium	0.2006	0.529	5.68
23	cadmium	0.2006	3.277	7.28
24	aluminum	0.625	0.105	10.72
25	aluminum	0.625	3.277	10.77
26	zircaloy-4	0.652	0.078	10.92
27	zircaloy-4	0.652	3.277	10.86

1) 0.509 cm 두께를 가진 B_4C-Al 재료의 양쪽 면의 1100 Al 피복재의 두께, 0.102 cm를 포함한다.

2) 흡수판의 너비는 35.6cm 대신 30.6cm를 사용한다.

3) US 계산법에서, 흡수판은 중심 연료집합체의 바깥쪽 셀 경계면의 안쪽에 위치해 있다. 그러므로 2번째 연료 집합체의 길이는 0.4cm 감소한다. 그러나 본 논문에서는 흡수판이 연료집합체에 인접해 있다고 가정한다. ($S_p = 0$)

Table 2-6. Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-013

Case No.	Type of Plate	Thickness (cm)	Separation of Fuel Clusters(cm)
1	304L steel	0.302	13.75
2	304L steel with 1.1% B	0.298	9.83
3	Boral B	0.292	8.30
4	Boraflex	0.546	8.37
5	cadmium	0.061	8.94
6	copper	0.337	13.47
7	copper-cadmium	0.357	10.57

Table 2-7. Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-016

Case No.	Pitch (cm)	Cluster Dimensions (X x Y)			Separation of Fuel Clusters (mm)	Distance to Center Fuel Cluster (mm)	Plate ⁴⁾	
		X-1	X-2	Y			material	thick
1	2.032	20	20	16	68.8	6.45	steel (no B)	4.85
2	2.032	20	20	16	76.4	27.32	steel (no B)	4.85
3	2.032	20	20	16	75.1	40.42	steel (no B)	4.85
4	2.032	20	20	16	74.2	6.45	steel (no B)	3.02
5	2.032	20	20	16	77.6	40.42	steel (no B)	3.02
6	2.032	20	20	17	104.4	6.45	steel (no B)	3.02
7	2.032	20	20	17	114.7	40.42	steel (no B)	3.02
8	2.032	20	20	17	75.6	6.45	steel (1.05% B)	2.98
9	2.032	20	20	17	96.2	40.42	steel (1.05% B)	2.98
10	2.032	20	20	17	73.6	6.45	steel (1.62% B)	2.98
11	2.032	20	20	17	95.2	40.42	steel (1.62% B)	2.98
12	2.032	20	20	17	63.3	6.45	boral	7.13
13	2.032	20	20	17	90.3	44.42	boral	7.13
14	2.032	22	20	16	50.5	6.45	boral	7.13
15	2.032	20	20	16	66.2	6.45	copper (no Cd)	6.46
16	2.032	20	20	16	77.2	27.32	copper (no Cd)	6.46
17	2.032	20	20	16	75.1	44.42	copper (no Cd)	6.46
18	2.032	24	20	15	68.8	6.45	copper (no Cd)	3.37
19	2.032	24	20	15	70.0	40.42	copper (no Cd)	3.37
20	2.032	24	20	15	51.5	6.45	copper (.989% Cd)	3.57
21	2.032	20	20	17	67.4	6.45	Cd	6.45
22	2.032	20	20	17	76.0	14.82	Cd	14.82
23	2.032	20	20	17	93.7	40.42	Cd	40.42
24	2.032	20	20	17	77.8	14.82	Cd	14.82
25	2.032	20	20	17	94.0	40.42	Cd	40.42
26	2.032	20	20	17	75.4	14.82	Cd	14.82
27	2.032	20	20	17	93.9	40.42	Cd	40.42
28	2.032	20	20	16	86.7	6.45	aluminum	6.45
29	2.032	20	20	16	87.8	40.42	aluminum	40.42
30	2.032	20	20	16	88.3	44.42	aluminum	44.42
31	2.032	20	20	16	87.9	6.45	zircaloy-4	6.45
32	2.032	20	20	16	87.8	40.42	zircaloy-4	40.42

4) 흡수판의 너비 35.6 cm, 높이 91.5 cm

Table 2-8. Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-017

Case No.	Pitch (cm)	Cluster Dimensions (X x Y)			Separation Between Clusters (cm)	Distance Between Reflecting Walls and Fuel Clusters (cm)	Reflecting Wall			
		X-1	X-2	Y			mat.	width	thick	length
1	2.032	19	19	16	13.1	0.0	lead	164.0	10.2	123.4
2	2.032	19	19	16	12.98	0.66	lead	164.0	10.2	123.4
3	2.032	19	19	16	10.51	2.616	lead	164.0	10.2	123.4
4	2.032	19	19	16	11.09	0.0	Uranium	152.3	7.65	121.9
5	2.032	19	19	16	13.19	1.321	Uranium	152.3	7.65	121.9
6	2.032	19	19	16	13.37	1.956	Uranium	152.3	7.65	121.9
7	2.032	19	19	16	12.96	2.616	Uranium	152.3	7.65	121.9
8	2.032	19	19	16	9.95	5.405	Uranium	152.3	7.65	121.9
9	2.032	19	19	16	7.82	10.676	Uranium	152.3	7.65	121.9
10	2.032	19	19	16	9.888	0.0	steel	147.3	17.85	121.9
11	2.032	19	19	16	10.438	0.66	steel	147.3	17.85	121.9
12	2.032	19	19	16	10.438	1.321	steel	147.3	17.85	121.9
13	2.032	19	19	16	9.598	2.616	steel	147.3	17.85	121.9
14	2.032	19	19	16	8.748	3.912	steel	147.3	17.85	121.9
15	1.684	20	25	18	8.566	0.0	steel	147.3	17.85	121.9
16	1.684	20	25	18	9.166	0.66	steel	147.3	17.85	121.9
17	1.684	20	25	18	9.096	1.321	steel	147.3	17.85	121.9
18	1.684	20	25	18	9.246	1.684	steel	147.3	17.85	121.9
19	1.684	20	25	18	8.866	2.344	steel	147.3	17.85	121.9
20	1.684	20	25	18	8.646	3.005	steel	147.3	17.85	121.9
21	1.684	20	25	18	8.126	3.912	steal	147.3	17.85	121.9
22	1.684	20	25	18	7.256	6.726	steal	147.3	17.85	121.9
23	1.684	20	23	18	9.646	0.0	lead	164.0	10.2	123.4
24	1.684	20	23	18	9.696	0.66	lead	164.0	10.2	123.4
25	1.684	20	23	18	8.086	3.276	lead	164.0	10.2	123.4
26	1.684	20	23	18	7.646	0.0	Uranium	152.3	7.65	121.9
27	1.684	20	23	18	9.086	1.321	Uranium	152.3	7.65	121.9
28	1.684	20	23	18	9.416	2.616	Uranium	152.3	7.65	121.9
29	1.684	20	23	18	8.776	3.912	Uranium	152.3	7.65	121.9

Table 2-9. Input data for critical experiment LEU-COMP-THERM-042

Case No.	Type of Plate	Plate Thickness(cm)	Separation of Clusters(cm) ⁵⁾
1	304L steel	0.302	8.28
2	304L steel (1.1%B)	0.298	4.80
3	Boral	0.292 ⁶⁾	2.69
4	Boraflex	0.546 ⁷⁾	2.98
5	cadmium	0.061	3.86
6	copper	0.337	7.79
7	copper-cadmium	0.357	5.43

5) 연료봉 표면에서 연료봉 표면까지 거리. 연료집합체의 바깥 셀 경계면사이의 거리는 이 값에서 4.14mm (격자 피치 - 연료봉 지름)를 빼서 구할 수 있다.

6) B_4C-Al 재료의 양쪽 면의 1100 Al 피복재의 두께, 0.38 mm를 포함한다.

7) 2.26 mm 두께를 가진 Boraflex의 양쪽 면의 Plexiglas의 두께, 1.6 mm를 포함한다.

제3절 데이터 분석

1. 정규성 검증

임계실험 결과 값에 가정된 통계분포에는 적절한 통계분석 방법이 수행되어야 한다. 계산된 k_{eff} 값에 대한 통계분석의 타당함을 보일 수 있는 분포로는 Gaussian 분포, 정규분포, Student's t 분포 및 Poisson 분포 등과 같이 다양한 특성의 분포가 있지만 본 연구에서는 정규분포를 사용하였다.

만일 data가 정규분포를 보이면 USL 결정에 일방공차한계(one-sided tolerance limit) 및 공차구간(tolerance band)과 같은 통계기법이 사용될 수 있으나 data가 정규분포를 보이지 않을 경우의 USL 결정은 비모수 통계분석(non-parametric analysis) 방법을 적용해야 한다.

2. 편이 및 편이 불확실도 결정

편이 및 편이불확실도 분석은 참고문헌 2의 2.4.1항에 기술된 방법에 따라 통계적 분석을 수행하였다. 이 방법은 측정 불확실도 및 계산 불확실도를 가중평균 (weighted mean) 값으로 결정한다. 만약 모델링 하고자 하는 임계실험이 임계($k=1.0$) 상태가 아니면 계산된 유효증배계수(k_{eff})를 다음과 같이 실험값 대비 정규화(normalizing) 하여 사용하며, 이때 이 정규화 과정은 계산된 편이의 고유 값에 영향을 미치지 않는다고 가정한다.

$$k_{norm} = \frac{k_{calc}}{k_{exp}} \quad (2.1)$$

계산된 k_{norm} 값은 이후에 계산되는 편이 및 편이 불확실도 결정에 사용된다.

Monte Carlo 불확실도 및 측정 불확실도는 각각의 실험에 대한 종합 불확실도 (combined uncertainty)로 계산하기 위하여 다음과 같이 root-sum-squared로 처리한다.

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{calc}^2 + \sigma_{exp}^2} \quad (2.2)$$

가중평균 k_{eff} (\bar{k}_{eff})는 가중인자(weighting factor) $1/\sigma_t^2$ 을 사용하여 계산되며 이 인자를 사용함으로써 불확실도가 큰 data에 대한 가중의 정도를 감소시킬 수 있다.

data set에서 “i” 번째 data는 아래첨자 “i”로 표기하였으며 별도의 설명이 없는 한 “i”번째 k_{eff} 에 대한 불확실도는 σ_i 이며 종합 불확실도는 식 (2.2)의 σ_t 이다.

일방하부공차한계(one-sided lower tolerance limit)에 대한 수식의 변수에 가중치를 부가하여 다루면 다음과 같다.

- 평균의 분산 (variance about the mean) :

$$s^2 = \frac{\left(\frac{1}{n-1}\right) \sum \frac{1}{\sigma_i^2} (k_{eff_i} - \bar{k}_{eff})^2}{\frac{1}{n} \sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (2.3)$$

- 평균 총 불확실도 (average total uncertainty) :

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{n}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (2.4)$$

- 가중 평균 유효증배계수 (weighted mean K_{eff}) :

$$\bar{k}_{eff} = \frac{\sum \frac{1}{\sigma_i^2} k_{eff_i}}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (2.5)$$

- 합동분산의 제곱근 (square root of pooled variance) :

$$S_p = \sqrt{s^2 + \bar{\sigma}^2} \quad (2.6)$$

여기서, s^2 : 평균의 분산 (variance of mean)
 n : 검증에 사용된 임계실험 수
 $\bar{\sigma}$: 평균 총 불확실도 (average total uncertainty)

편이는 다음과 같이 결정된다.

$$\text{편이(bias)} = \begin{cases} \bar{k}_{eff} - 1.0 & : \bar{k}_{eff} < 1.0 \\ 0.0 & : \bar{k}_{eff} \geq 1.0 \end{cases} \quad (2.7)$$

3. 데이터 경향성 분석

데이터의 경향성은 계산결과에 대한 회귀추세선(regression fit)을 이용하여 결정하며 데이터의 점들을 육안으로 확인함으로써 편이에서의 경향성을 결정할 수 있다.

다음의 식에서 “x”는 어떤 인자, 예를 들어 농축도 등을 표현하는 독립변수이며, 변수 “y”는 k_{eff} 를 나타낸다. 변수 “a”와 “b”는 함수의 계수이며 “b”는 기울기, “a”는 절편(교차점)이다.

NUREG/CR-6698에 따라, 데이터의 직선에 대하여 가중치를 적용하기 위하여 다음의 식이 사용된다.

$$\begin{aligned}
 Y(x) &= a + bx \\
 a &= \frac{1}{\Delta} \left[\sum \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \sum \frac{y_i}{\sigma_i^2} - \sum \frac{x_i}{\sigma_i^2} \sum \frac{yx_i}{\sigma_i^2} \right] \\
 b &= \frac{1}{\Delta} \left[\sum \frac{1}{\sigma_i^2} \sum \frac{yx_i}{\sigma_i^2} - \sum \frac{x_i}{\sigma_i^2} \sum \frac{y_i}{\sigma_i^2} \right] \\
 \Delta &= \sum \frac{1}{\sigma_i^2} \sum \frac{x_i}{\sigma_i^2} - \left(\sum \frac{x_i}{\sigma_i^2} \right)^2
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

데이터가 일단 선으로 맞추어지면 적합성 검정(goodness of fit)을 하여야 하며, NUREG/CR-6698에 따라 적합성 검정의 결정은 두 단계로 이루어진다.

첫 번째 단계는 회기 추세선의 유효성을 육안으로 평가할 수 있도록 독립변수에 대하여 그래프 상에 점으로 찍어보는 것이다.

두 번째 단계는 선형관계를 점으로 파악한 후 적합성 검정을 수식으로 결정하는 것이다. 데이터의 점들을 육안으로 검사한다는 것은 적합성의 정도를 파악하기 어렵기 때문에 적합성 검정을 수식으로 측정하는데 사용되는 표준 방법의 하나로 선형상관계수(linear correlation coefficient)라는 측정방법이 도입된다. 선형상관계수는 두 변수 간에 존재하는 선형성의 정도를 정량적으로 측정한다. 가중치가 적용된 데이터에 대하여 선형상관계수는 다음과 같이 정의된다.

$$r = \frac{\sum \frac{1}{\sigma_i^2} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum \frac{1}{\sigma_i^2} (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum \frac{1}{\sigma_i^2} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.9)$$

여기서, 독립변수에 대한 가중평균(weighted mean) \bar{x} 는 다음과 같으며,

$$\bar{x} = \frac{\sum \frac{1}{\sigma_i^2} x_i}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (2.10)$$

종속변수에 대한 가중평균 \bar{y} 는 식 (2-5)의 \bar{k}_{eff} 이다.

선형상관계수 값은 r^2 으로 표현되며, r^2 값이 1에 가까울수록 선형성이 좋음을 의미한다.

선형상관계수를 이용하는 방법에 추가하여 선형회기선의 통계적인 중요성 여부를 판단하기 위하여 Student t-test를 이용하며, 선형회기선의 기울기(b)가 특정 값(b_0)과 동일하면 통계적으로 중요한 경향성을 가지게 된다. 임계실험 계산 결과의 검증을 목적으로 귀무가설(H_0)을 통계적으로 유의한 경향이 존재하지 않다고 설정하며($b=0$), 유의수준(α) 0.05의 대립가설을 설정한다. ($b_0=0$)

즉, 귀무가설의 기각 여부를 결정하기 위하여 slope test(t_{score})가 계산되며, 이 값을 Student t 분포와 비교한다. 회기선의 기울기에 대한 t_{score} 는 다음과 같이 주어진다.

$$t_{score} = \frac{b - b_0}{\sqrt{\frac{MSerror}{\sum (x_i - \bar{x})^2}}} \quad (2.11)$$

MSerror는 오차에 대한 평균제곱편차로서 다음과 같이 정의된다.

$$MSerror = \frac{\text{오차의 제곱합 (SSerror)}}{\text{자유도 (n-2)}} \quad (2.12)$$

따라서, slope test(t_{score})는 다음과 같다.

$$t_{score} = \frac{(b - b_0) \sqrt{n-2}}{\sqrt{\frac{SSerror}{\sum(x_i - \bar{x})^2}}} \quad (2.13)$$

또한, 임계실험 검증문제에서의 오차의 제곱합(SSerror)은 다음과 같다.

$$SSerror = \sum [k_{effi} - (a + bx_i)]^2 \quad (2.14)$$

만일 $|t_{score}| > t_{\alpha/2, n-2}$ 이면 귀무가설은 기각된다. ($\alpha = 0.05$, 유의수준)

4. 데이터 처리를 위한 통계분석 방법

상부안전한계치(USL; Upper Safety Limit)를 설정하기 위해서는 적절한 통계기법을 선정해야 한다. 문헌 등을 통하여 적용할 통계기법은 다양하지만, NUREG/CR-6698에 의거하여 검증에 사용되는 임계실험값이 정규성 검정을 통과하면 적용할 수 있는 기법은 일방공차한계 및 공차구간을 이용한 통계기법이며, 정규성 검정을 통과하지 못할 경우에는 비모수 통계처리법으로 상부안전한계치를 결정하여야 한다.

본 연구에서는 정규성 검정을 통과할 경우에 사용되는 두 가지 방법을 적용하였다.

가. 일방공차한계 (one-sided tolerance limit)

임계실험 결과에 뚜렷한 경향이 나타나지 않을 경우에는 하부공차한계(lower tolerance limit)가 적용되어야 한다. 하부공차한계를 적용하기 위해서는 임계실험결과가 정규분포를 가져야 한다.

하부공차한계는 data의 95%가 K_L 값보다 위에 있을 확률이 최소한 95% 신뢰도를 가지고 계산되어야 한다. 이 값은 통계표(참고문헌 9)의 일방하부공차계수(one-sided lower tolerance factor, U)를 사용하여 구할 수 있다. 표본 수가 50개 이상일 경우에는 통계표를 이용하여 표본 수에 해당하는 값을 적용할 수 있지만, 일반적으로 보수성을 고려하여 표본 수 50개에 해당하는 값을 적용한다.

일방하부 공차한계는 다음과 같이 정의된다.

$$K_L = \bar{k}_{eff} - US_P \quad (2.15)$$

$$\text{만일 } \bar{k}_{eff} \geq 1 \text{ 이면, } K_L = 1 - US_P \quad (2.16)$$

여기서, $S_P =$ square root (pooled variance)

$U =$ 일방하부공차계수 (one-sided lower tolerance factor)

따라서,

$$USL = K_L - \Delta_{sm} - \Delta_{AOA} \quad (2.17)$$

이며, Δ_{sm} 은 미입계여유도, Δ_{AOA} 은 적용영역(AOA; Area of Applicability)을 확장할 경우 필요한 추가의 미입계여유도이다. 만약 AOA 확장이 없으면 Δ_{AOA} 은 영(zero)이다.

나. 공차구간 (tolerance band)

계산된 k_{eff} 와 독립변수간의 관계가 결정될 수 있다면 일방하부공차구간이 사용될 수 있으며, 이는 추세곡선(fitted curve)이 k_{eff} 값들의 분포보다 위에 위치하게 되므로 보수적인 방법이 된다. 실제로, 공차구간 수식은 보정곡선(calibration curve)이며, 편이를 예측하기 위하여 주어진 공차구간이 여러 번 사용될 수 있다고 예상하기 때문에 이 방법을 선택하는 것이다.

일방하부공차구간은 다음과 같이 표현된다.

$$K_L = K_{fit}(x) - S_{P_{fit}} \left\{ \sqrt{2F_a^{(2, n-2)} \left[\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right]} + z_{2P-1} \sqrt{\frac{(n-2)}{\chi_{1-\gamma, n-2}^2}} \right\} \quad (2.18)$$

$K_{fit}(x)$ 는 경향분석을 통해 유도되는 함수이다. 양(positive)의 편이는 비보수적이기 때문에 $K_{fit}(x) > 1$ 일 경우 모든 x에 대하여 다음 식을 적용해야 한다.

$$K_L = 1 - S_{P_{fit}} \left\{ \sqrt{2F_a^{(2, n-2)} \left[\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right]} + z_{2P-1} \sqrt{\frac{(n-2)}{\chi_{1-\gamma, n-2}^2}} \right\} \quad (2.19)$$

여기서,

$P =$ 요구 수준 (desired confidence), 0.95

- $F_a^{(fit, n-2)}$ = n-2의 자유도(degree of freedom)를 가지는 F 분포
- n = 임계실험 k_{eff} 값의 수
- x = fitting 하고자 하는 독립변수
- x_i = i번째 k_{eff} 값에 해당하는 data set에서의 독립 인자
- \bar{x} = 독립변수의 가중 평균값
- z_{2P-1} = P 분율을 포함하는 Gaussian 분포 또는 정규분포의 대칭 백분위수(percentile)
- γ = (1-p)/2
- $\chi_{1-\gamma, n-2}^2$ = Chi square 상부 백분위수(percentile)

가중치 분석을 위하여,

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = \frac{\sum \frac{1}{\sigma_i^2} (x_i - \bar{x})^2}{\frac{1}{n} \sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (2.20)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum \frac{1}{\sigma_i^2} x_i}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (2.21)$$

$$S_{pfit} = \sqrt{s_{fit}^2 + \bar{\sigma}^2} \quad (2.22)$$

여기서,

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{n}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (2.23)$$

$$s_{fit}^2 = \frac{\left(\frac{1}{n-2}\right) \sum \left\{ \frac{1}{\sigma_i^2} [k_{eff_i} - K_{fit}(x_i)]^2 \right\}}{\frac{1}{n} \sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (2.24)$$

K_L 에 대한 공식에 한하여 편이 및 편이 불확실도는 다음과 같다.

$$bias = \begin{cases} K_{fit} - 1.0 & : K_{fit} < 1.0 \\ 0.0 & : K_{fit} \geq 1.0 \end{cases} \quad (2.25)$$

$$bias\ uncertainty = S_{P_{fit}} \left\{ \sqrt{2F_a^{(2, n-2)} \left[\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right]} + z_{2P-1} \sqrt{\frac{(n-2)}{\chi_{1-\gamma, n-2}^2}} \right\} \quad (2.26)$$

제3장 전산코드 검증 결과

제1절 정규성 검정 (Normality Test)

정규성 검정(Normality Test)이란 모집단의 확률분포가 정규분포를 따르고 있는가를 검사하는 것이다. NRC 지침에 따르면 반드시 임계실험 결과에 대한 정규분포 점검을 수행하도록 권고하고 있다.

정규성 검정은 일부 통계검정(예: t-test)에서 정규성을 가정하고 있기 때문에 정규 분포를 따르지 않는다면 검정 자체가 의미가 없어진다. 카이제곱 검정(chi-square 혹은 X^2 Test)은 보통 교차분석을 위한 도구로 많이 사용하지만, 데이터가 특정 분포를 따르는지 검정하는데도 사용할 수 있다. 본 검정에서는 excel의 함수를 이용하여, 정규분포 상의 확률을 통해 기대도수를 구한 다음, 실제 관측 도수와 유의한 수준에서 일치하는지 검정하였다.

115개의 임계실험의 SCALE 계산결과에 대한 분포를 확인하기 위하여 excel을 이용하여 Figure 3-1과 같이 히스토그램을 만들었다.

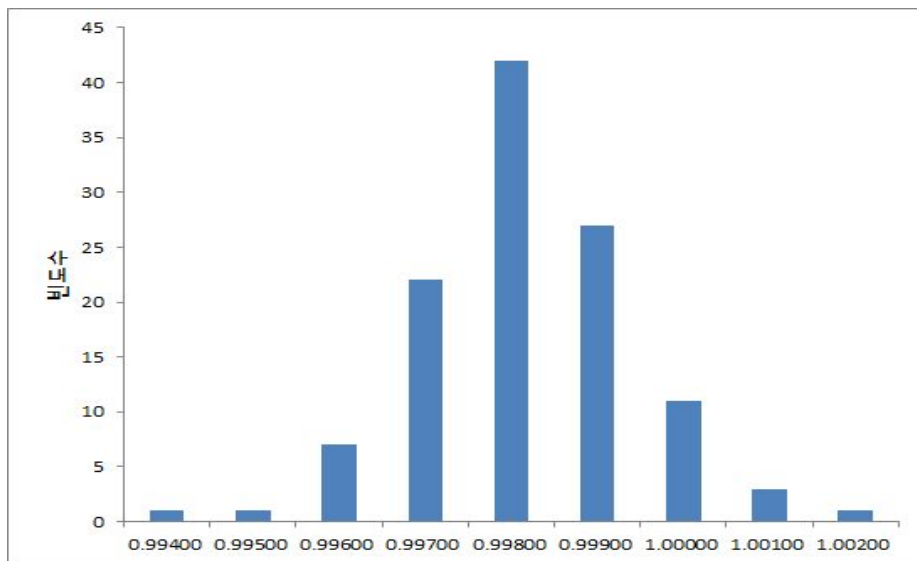


Figure 3-1 Histogram of critical experiment result

히스토그램을 보면 정규분포를 따르는 것 같지만, 가설검정을 통하여 정규성을 검증해야 한다. 우선 두 가지 가설을 세우면,

- 귀무가설 (H_0) : 데이터가 정규분포를 이룬다.
- 대립가설 (H_1) : 데이터가 정규분포를 이루지 않는다.

카이제곱 검정을 이용하여 유의확률(p값) 및 임계치(χ^2)에 따라 귀무가설을 기각할지 결정한다. excel의 NORMDIST 함수로 구한 구간별 확률에 전체 표본 수를 곱해 기대도수를 구하게 된다. 즉, 입력 데이터가 정규 분포를 완벽하게 따른다면 각 구간별로 이 만큼의 도수가 나와야 하지만 현실적으로 어렵기 때문에 유의한 수준에서 정규분포를 따르는지 통계적으로 검증하는 것이다. 그리고 관측도수와 기대도수 간의 차이를 잔차라고 하는데, 검정통계량 χ^2 은 상대적인 잔차제곱의 합으로 나타낸다. 유의수준은 분석자가 결정하는데, 본 검증에서는 0.05를 사용했다. 자유도는 다음과 같이 계산하였다.

- 자유도: 전체 구간 수(9) - 추정된 모수의 수(2=평균과 표준편차) - 1(상수)

마지막으로 임계치와 유의확률은 excel의 CHINV 및 CHDIST 함수를 이용하여 구하였다.

Table 3-1 Analysis data for Normality Test (1)

구간	빈도수	구간확률	기대도수	상대잔차 제곱
0.9940	1	0.0013	0.1473	4.9373
0.9950	1	0.0127	1.4656	0.1479
0.9960	7	0.0702	8.0734	0.1427
0.9970	22	0.2043	23.4914	0.0947
0.9980	42	0.3147	36.1905	0.9326
0.9990	27	0.2570	29.5506	0.2202
1.0000	11	0.1111	12.7823	0.2485
1.0010	3	0.0254	2.9234	0.0020
1.0020	1	0.0033	0.3755	1.0385
합계	115	1	115	7.7644

Table 3-2 Analysis data for Normality Test (2)

유의수준	0.05
자유도	6
임계치	12.5916
유의확률	0.2559

결과 해석 :

1. 검정통계량에 기초한 해석

상대잔차 제곱합(7.7644) < 임계치(12.5916) 이므로 귀무가설(H_0)을 기각할 수 없다. 따라서 정규분포를 따른다고 볼 수 있다.

2. 유의확률(P)에 의한 해석

유의확률(0.2559) > 유의수준(0.05) 이므로 귀무가설(H_0)을 채택하여 정규분포를 따른다고 볼 수 있다.

제2절 편이 및 편이 불확실도 결정

임계실험에 대한 편이 및 편이 불확실도는 Table 3-4의 계산결과를 이용하여 각각의 Monte Carlo Code에 대하여 다음과 같이 결정되었다.

Table 3-3 Bias and Bias Uncertainty of each Code

항 목	SCALE	MCNP	SERPENT
Variance about the mean (s^2)	1.691E-06	1.516E-06	1.491E-06
Average total uncertainty (σ_{bar}^2)	6.027E-06	6.013E-06	6.044E-06
Weighted mean k_{eff} value ($k_{\text{bar}_{\text{eff}}}$)	0.9979	0.9954	0.9991
Square root of the pooled variance (S_p)	0.0028	0.0027	0.0027
Number of experiments	115	115	115
Best Estimate, Untrended Bias and Bias Uncertainty	-0.0021±0.0028	-0.0046±0.0027	-0.0009±0.0027

Table 3-4 Calculation result of critical experiment (1/6)

ID	case	농축도	연료지름	연료편피치	k_{exp}	σ_{exp}	SCALE		MCNP		SERPENT	
							k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}
lct01	1	2.350	1.270	2.032	0.9998	0.0030	0.9986	0.0002	0.9967	0.0002	0.9995	0.0002
	2	2.350	1.270	2.032	0.9998	0.0030	0.9972	0.0002	0.9952	0.0002	0.9989	0.0002
	3	2.350	1.270	2.032	0.9998	0.0030	0.9968	0.0002	0.9945	0.0002	0.9982	0.0002
	4	2.350	1.270	2.032	0.9998	0.0030	0.9977	0.0002	0.9958	0.0002	0.9994	0.0002
	5	2.350	1.270	2.032	0.9998	0.0030	0.9958	0.0002	0.9933	0.0002	0.9974	0.0002
	6	2.350	1.270	2.032	0.9998	0.0030	0.9975	0.0002	0.9953	0.0002	0.9989	0.0002
	7	2.350	1.270	2.032	0.9998	0.0031	0.9967	0.0002	0.9943	0.0002	0.9975	0.0002
	8	2.350	1.270	2.032	0.9998	0.0030	0.9959	0.0002	0.9935	0.0002	0.9976	0.0002
lct02	1	4.310	1.415	2.540	0.9997	0.0020	0.9973	0.0003	0.9949	0.0002	0.9980	0.0003
	2	4.310	1.415	2.540	0.9997	0.0020	0.9995	0.0002	0.9964	0.0002	0.9993	0.0003
	3	4.310	1.415	2.540	0.9997	0.0020	0.9982	0.0003	0.9955	0.0002	0.9992	0.0003
	4	4.310	1.415	2.540	0.9997	0.0018	0.9978	0.0002	0.9953	0.0002	0.9989	0.0003
	5	4.310	1.415	2.540	0.9997	0.0019	0.9971	0.0002	0.9934	0.0002	0.9975	0.0003
lct09	1	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9980	0.0003	0.9951	0.0002	0.9986	0.0003
	2	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9983	0.0002	0.9954	0.0002	0.9986	0.0003
	3	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9976	0.0002	0.9944	0.0002	0.9979	0.0003
	4	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9984	0.0002	0.9953	0.0002	0.9988	0.0003
	5	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9958	0.0003	0.9962	0.0002	1.0002	0.0003
	6	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9931	0.0002	0.9953	0.0002	0.9988	0.0003
	7	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9991	0.0002	0.9968	0.0002	1.0000	0.0003

Table 3-4 Calculation result of critical experiment (2/6)

ID	case	농축도	연료지름	연료핀피치	k_{exp}	σ_{exp}	SCALE		MCNP		SERPENT	
							k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}
	8	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9983	0.0003	0.9956	0.0002	0.9991	0.0003
	9	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9986	0.0003	0.9957	0.0002	0.9992	0.0003
	10	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9980	0.0002	0.9951	0.0002	0.9988	0.0003
	11	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9982	0.0002	0.9952	0.0002	0.9994	0.0003
	12	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9985	0.0002	0.9959	0.0002	0.9995	0.0003
	13	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9985	0.0003	0.9956	0.0002	0.9991	0.0003
	14	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9967	0.0002	0.9945	0.0002	0.9981	0.0003
	15	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9990	0.0003	0.9961	0.0002	1.0002	0.0003
	16	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9985	0.0002	0.9957	0.0002	0.9986	0.0003
	17	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9986	0.0002	0.9965	0.0002	0.9992	0.0003
	18	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9979	0.0002	0.9949	0.0002	0.9991	0.0003
	19	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9982	0.0002	0.9962	0.0002	0.9994	0.0003
	20	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9982	0.0002	0.9954	0.0002	0.9981	0.0003
	21	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9990	0.0002	0.9962	0.0002	0.9990	0.0003
	22	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9992	0.0003	0.9959	0.0002	0.9997	0.0003
	23	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9987	0.0002	0.9961	0.0002	0.9993	0.0003
	24	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9985	0.0002	0.9944	0.0002	0.9983	0.0003
	25	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9982	0.0002	0.9954	0.0002	0.9988	0.0003
	26	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9987	0.0002	0.9956	0.0002	0.9991	0.0003
	27	4.310	1.415	2.540	1.0000	0.0021	0.9988	0.0002	0.9954	0.0002	0.9993	0.0003

Table 3-4 Calculation result of critical experiment (3/6)

ID	case	농축도	연료지름	연료편피치	k_{exp}	σ_{exp}	SCALE		MCNP		SERPENT	
							k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}
lct13	1	4.310	1.415	1.892	1.0000	0.0018	1.0004	0.0003	0.9962	0.0002	1.0013	0.0003
	2	4.310	1.415	1.892	1.0000	0.0018	1.0003	0.0003	0.9966	0.0002	1.0014	0.0003
	3	4.310	1.415	1.892	1.0000	0.0018	1.0001	0.0003	0.9967	0.0002	1.0009	0.0003
	4	4.310	1.415	1.892	1.0000	0.0018	1.0011	0.0002	0.9976	0.0002	1.0021	0.0003
	5	4.310	1.415	1.892	1.0000	0.0032	1.0000	0.0003	0.9963	0.0002	1.0003	0.0003
	6	4.310	1.415	1.892	1.0000	0.0018	0.9997	0.0002	0.9959	0.0002	1.0004	0.0003
	7	4.310	1.415	1.892	1.0000	0.0018	0.9994	0.0002	0.9957	0.0002	1.0007	0.0003
lct16	1	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9974	0.0002	0.9951	0.0002	0.9987	0.0002
	2	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9961	0.0002	0.9942	0.0002	0.9972	0.0002
	3	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9974	0.0002	0.9947	0.0002	0.9982	0.0002
	4	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9962	0.0002	0.9937	0.0002	0.9976	0.0002
	5	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9966	0.0002	0.9944	0.0002	0.9984	0.0002
	6	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9971	0.0002	0.9946	0.0002	0.9982	0.0002
	7	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9969	0.0002	0.9951	0.0002	0.9982	0.0002
	8	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9970	0.0002	0.9952	0.0002	0.9984	0.0002
	9	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9975	0.0002	0.9953	0.0002	0.9992	0.0002
	10	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9969	0.0002	0.9947	0.0002	0.9983	0.0002
	11	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9977	0.0002	0.9959	0.0002	0.9989	0.0002
	12	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9970	0.0003	0.9950	0.0002	0.9986	0.0002
	13	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9976	0.0002	0.9954	0.0002	0.9988	0.0002

Table 3-4 Calculation result of critical experiment (4/6)

ID	case	농축도	연료지름	연료편피치	k_{exp}	σ_{exp}	SCALE		MCNP		SERPENT	
							k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}
	14	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9977	0.0002	0.9960	0.0002	1.0009	0.0002
	15	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9964	0.0002	0.9949	0.0002	0.9983	0.0002
	16	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9948	0.0002	0.9925	0.0002	0.9956	0.0002
	17	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9955	0.0002	0.9931	0.0002	0.9974	0.0002
	18	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9975	0.0002	0.9948	0.0002	0.9986	0.0002
	19	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9977	0.0002	0.9950	0.0002	0.9989	0.0002
	20	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9974	0.0002	0.9953	0.0002	0.9986	0.0002
	21	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9978	0.0002	0.9954	0.0002	0.9985	0.0002
	22	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9977	0.0002	0.9956	0.0002	0.9989	0.0002
	23	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9974	0.0002	0.9953	0.0002	0.9988	0.0002
	24	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9974	0.0002	0.9950	0.0002	0.9984	0.0002
	25	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9972	0.0002	0.9958	0.0002	0.9987	0.0002
	26	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9978	0.0003	0.9959	0.0002	1.0012	0.0002
	27	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9972	0.0002	0.9955	0.0002	0.9981	0.0002
	28	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9970	0.0002	0.9948	0.0002	0.9980	0.0002
	29	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9967	0.0002	0.9943	0.0002	0.9985	0.0002
	30	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9962	0.0002	0.9941	0.0002	0.9980	0.0002
	31	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9975	0.0003	0.9952	0.0002	0.9992	0.0002
	32	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9972	0.0002	0.9950	0.0002	0.9987	0.0002

Table 3-4 Calculation result of critical experiment (5/6)

ID	case	농축도	연료지름	연료편피치	k_{exp}	σ_{exp}	SCALE		MCNP		SERPENT	
							k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}
lct17	1	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9999	0.0002	1.0008	0.0002	1.0026	0.0002
	2	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9993	0.0002	1.0004	0.0002	1.0026	0.0002
	3	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9982	0.0002	0.9975	0.0002	1.0010	0.0002
	4	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9970	0.0002	0.9947	0.0002	0.9974	0.0002
	5	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9990	0.0002	0.9970	0.0002	0.9999	0.0002
	6	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9990	0.0002	0.9973	0.0002	1.0000	0.0002
	7	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9991	0.0002	0.9970	0.0002	0.9995	0.0002
	8	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9967	0.0002	0.9950	0.0002	0.9982	0.0002
	9	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9961	0.0002	0.9938	0.0002	0.9975	0.0002
	10	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9976	0.0002	0.9915	0.0002	0.9941	0.0002
	11	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9978	0.0002	0.9965	0.0002	0.9991	0.0002
	12	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9977	0.0002	0.9967	0.0002	0.9990	0.0002
	13	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9979	0.0002	0.9958	0.0002	0.9993	0.0002
	14	2.350	1.270	2.032	1.0000	0.0031	0.9979	0.0002	0.9959	0.0002	0.9993	0.0002
	15	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9965	0.0002	0.9940	0.0002	0.9982	0.0003
	16	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9976	0.0002	0.9952	0.0002	0.9995	0.0003
	17	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9991	0.0003	0.9960	0.0002	1.0004	0.0003
	18	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9975	0.0002	0.9945	0.0002	0.9994	0.0003
	19	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9979	0.0002	0.9951	0.0002	0.9998	0.0003
	20	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9967	0.0002	0.9939	0.0002	0.9987	0.0002

Table 3-4 Calculation result of critical experiment (6/6)

ID	case	농축도	연료지름	연료편피치	k_{exp}	σ_{exp}	SCALE		MCNP		SERPENT	
							k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}	k_{calc}	σ_{calc}
	21	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9966	0.0002	0.9931	0.0002	0.9984	0.0003
	22	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9953	0.0002	0.9926	0.0002	0.9966	0.0002
	23	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9976	0.0002	0.9981	0.0002	1.0021	0.0002
	24	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9985	0.0002	0.9984	0.0002	1.0023	0.0002
	25	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9965	0.0002	0.9947	0.0002	0.9983	0.0002
	26	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9956	0.0002	0.9919	0.0002	0.9956	0.0002
	27	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9969	0.0002	0.9937	0.0002	0.9980	0.0002
	28	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9977	0.0002	0.9939	0.0002	0.9991	0.0002
	29	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0028	0.9979	0.0002	0.9942	0.0002	0.9991	0.0002
lct42	1	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0016	0.9967	0.0002	0.9939	0.0002	0.9989	0.0003
	2	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0016	0.9970	0.0003	0.9949	0.0002	0.9985	0.0003
	3	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0016	0.9976	0.0002	0.9960	0.0002	0.9998	0.0002
	4	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0017	0.9981	0.0002	0.9965	0.0002	0.9988	0.0003
	5	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0033	0.9981	0.0002	0.9959	0.0002	0.9994	0.0003
	6	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0016	0.9981	0.0002	0.9959	0.0002	0.9998	0.0003
	7	2.350	1.270	1.684	1.0000	0.0018	0.9960	0.0002	0.9941	0.0002	0.9983	0.0003

제3절 경향 분석

1. SCALE 계산결과 경향 분석

제2장 제3절의 3항에 따라 SCALE 코드체계에 대하여 다음 항목들에 대한 경향을 분석하였다.

- 농축도 (Enrichment; weight % of U²³⁵)
- 격자 피치 (Pin Pitch; cm)
- 연료봉 지름 (Diameter of Fuel Pellet; cm)

Table 3-5 Summary of Calculation result (SCALE)

	농축도	격자 피치	연료봉 지름
○ Weighted Linear Least Square Fit			
Intercept	0.9958	0.9968	0.9958
Slope	0.0006	-0.0005	0.0006
○ Linear Correlation Coefficient			
y-bar	0.9979	0.9979	0.9979
x-bar	3.3027	2.1379	1.3405
r ²	0.2328	0.0194	0.2328
○ Student-t test			
Slope Test (t _{score})	6.1100	1.4201	6.1100
Student-t Compare Value	± 1.9812	± 1.9812	± 1.9812
Result	Statistically Significant	Not Statistically Significant	Statistically Significant
○ Parameter Range			
Minimum	2.35	1.684	1.27
Maximum	4.31	2.54	1.415

가. 농축도

저장랙에 저장되는 연료의 농축도 범위는 1.6w/o ~ 5.0w/o 이다. Figure 3-2를 통해 볼 때 K_{eff} 에 양(+)의 기울기로 약간의 통계적 경향이 나타나는 것으로 판단할 수 있으며, slope test(t_{score}) 및 선형상관계수(r^2) 분석 결과 연료의 농축도는 EALF 보다는 강하게 유효증배계수(K_{eff})에 경향이 있는 것으로 나타났다.

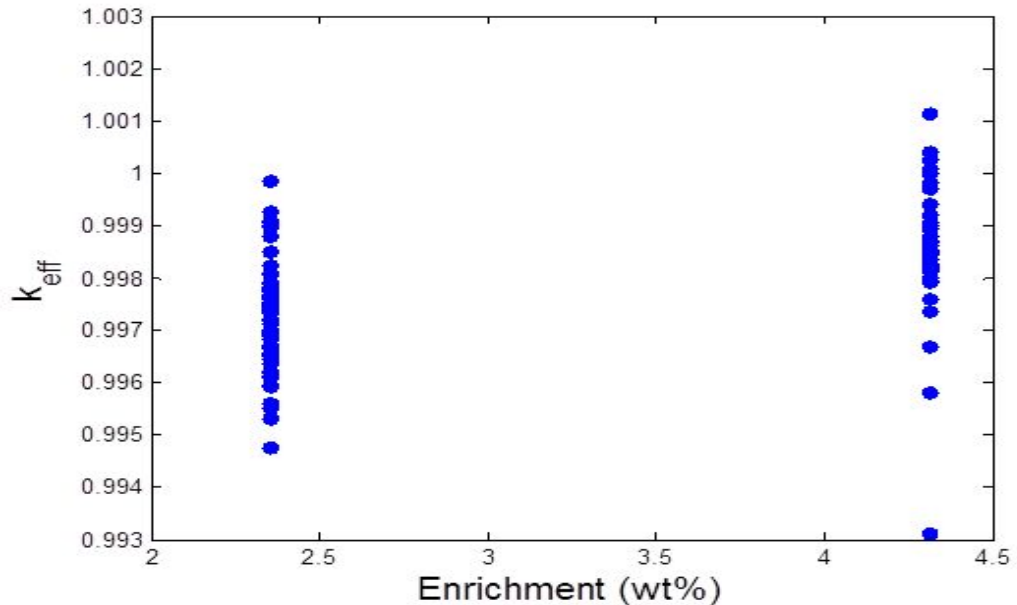


Figure 3-2 Calculated K_{eff} vs. fuel enrichment (SCALE)

또한, K_{eff} 값은 연료 농축도의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k\text{-fit(농축도(w/o))} = 0.9958 + 0.0006 \times (\text{농축도(w/o)}) \quad (3.1)$$

나. 연료봉 지름

원전연료집합체의 기하학적 변수 중 연료봉 지름이 SACLE6.1에서 적절하게 처리되는지 여부를 결정하기 위한 경향성 분석을 수행하였다. Figure 3-3의 분석 결과를 통해 볼 때 농축도와 유사하게 연료봉 지름의 K_{eff} 에 대한 경향이 나타남을 볼 수 있으며 Table 3-5의 slope test(t_{score}) 및 선형상관계수(r^2) 분석 결과 연료 핀 지름이 통

계적으로 의미 있는 경향이 있음을 확인하였다. 이러한 경향의 근본적 원인은 불분명하지만 종종 핀 지름의 경향은 중성자 스펙트럼의 경향과 관련이 있다고 알려져 있고 일반적으로 주요 원인은 실험 세트들 간의 차이점으로 인해 발생한다고 할 수 있다.

K_{eff} 값은 연료 핀 지름의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k\text{-fit}(\text{핀 지름}) = 0.9958 + 0.0006 \times (\text{핀 지름}) \quad (3.2)$$

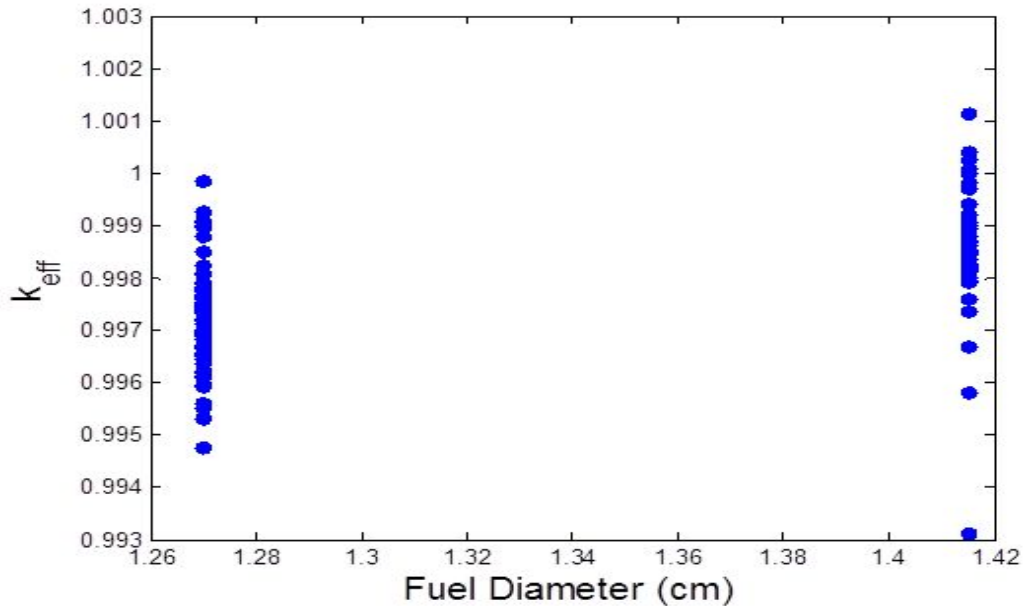


Figure 3-3 Calculated Keff vs. fuel diameter (SCALE)

다. 격자 피치

원전연료집합체의 기하학적 변수 중 다른 하나인 격자 피치가 SACLE6.1에서 적절하게 처리되는지 여부를 결정하기 위한 경향성 분석을 수행하였다. Figure 3-4에서 볼 때 격자 피치의 K_{eff} 에 대한 경향은 없는 것으로 볼 수 있으며, Table 3-5의 slope test(t_{score}) 및 선형상관계수(r^2) 분석 결과도 격자 피치는 통계적으로 의미가 없는 것으로 나타났다.

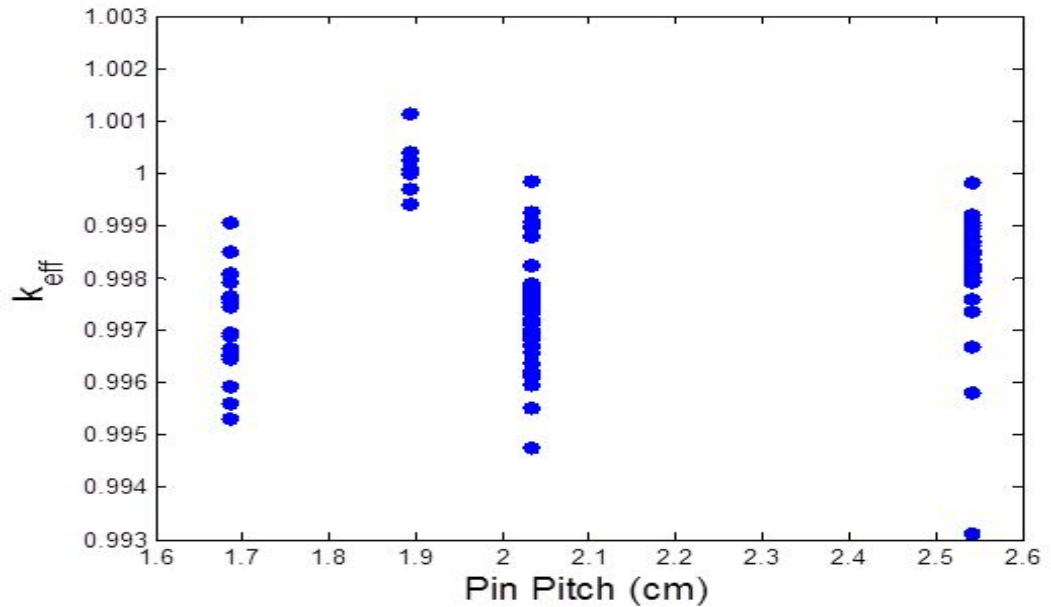


Figure 3-4 Calculated K_{eff} vs. pin pitch (SCALE)

라. SCALE 경향분석 요약

Figure 3-2 부터 3-4는 각각 우라늄 농축도, 연료봉 지름 및 연료 사이 거리(격자 피치)의 함수로서 K_{eff} 값의 산점도를 나타낸다. 산점도를 통해 볼 때, 연료피치는 K_{eff} 와 함수관계를 도출하기 어려우나, 우라늄 농축도와 연료봉 지름은 K_{eff} 와 어느 정도의 함수관계가 있음을 보여준다. 이러한 결론은 경향 분석의 결과를 보여주는 Table 3-5에서도 확인할 수 있다.

세 종류의 독립된 인자들의 함수로 K_{eff} 를 결정하기 위하여 선형회기(Linear regression) 방법을 사용하였으며, 또한 각각 인자들의 분포 경향이 통계적으로 유의한 지 여부를 결정하기 위하여 두 개의 적합성 검정방법(r^2 및 Student-t test)을 사용하였다. 각각의 변수에 대한 r^2 값과 Student-t test 결과를 볼 때, 연료 사이의 거리인 격자피치 함수로서의 K_{eff} 경향은 통계적으로 의미가 없음을 보여주는 반면, U^{235} 농축도 및 연료지름 함수로서의 K_{eff} 경향은 통계적으로 의미가 있음을 보여준다. 따라서 편이(bias)는 U^{235} 농축도 및 연료지름에 대한 함수로 결정될 수 있다.

Table 3-6은 농축도에 대한 편이 및 편이 불확실도 계산을 위한 계산인자로 이들 인자를 이용하여 농축도의 제한 범위를 결정할 수 있으며 임계평가를 하고자 하는 시설의 농축도에 대한 편이 및 편이 불확실도를 Table 3-7에 기술하였다. 또한 같은 원리로 연료봉 지름에 대한 계산인자 및 계산결과를 Table 3-8 및 3-9에 기술하였다.

NUREG/CR-6698에 의하면 계산된 K_{eff} 값과 독립된 변수 사이의 어떤 상관관계가 결정되어 지면 일방하부공차구간(one-sided lower tolerance band)을 적용하도록 권고하고 있다. 이 방법은 보수적인 방법으로써 K_{eff} 값의 실제 분포보다 위에 USL 곡선이 위치하게 된다. 일방하부공차구간(one-sided lower tolerance band) 방법은 위의 “나. 공차구간(tolerance band)”항에 기술되어 있으며, 대표적인 결과가 Table 3-7 및 3-9와 같다. 또한 다른 농축도 및 연료지름에서의 편이 및 편이 불확실도 계산에 필요한 정보는 Table 3-6 및 3-8과 같다. 그리고 실제 연료저장시설의 임계도 평가에는 Table 3-3의 best estimate, un-trended bias & bias uncertainty 값과 Table 3-7 및 3-9의 경향분석에서 계산된 값 중 가장 큰 값을 사용해야 한다.

Table 3-6 Bias and Bias uncertainty Calculation factor
 as a function of enrichment (SCALE)

	k-fit as a Function of Enrichment
Intercept	0.9958
Slope	0.0006
	One-Sided Tolerance Band Parameters as a Function of Initial Enrichment
$\sum(x_i - \bar{x})^2$	110.3602
\bar{x}	3.3027
$S_{P_{fit}}$	0.0027
σ^2	6.027E-06
S_{fit}^2	1.309E-06
$F_a^{(2, n-2)}$	3.0766
z_{2P-1}	1.6449
γ	0.025
$\chi_{1-\gamma, n-2}^2$	85.4728

Table 3-7 Bias and Bias uncertainty as a function of enrichment (SCALE)

enrichment	k-fit	bias	bias uncertainty
1.00	0.9964	-0.0036	0.0041
1.40	0.9967	-0.0033	0.0040
1.60	0.9968	-0.0032	0.0039
1.80	0.9969	-0.0031	0.0039
2.00	0.9971	-0.0029	0.0039
2.40	0.9973	-0.0027	0.0038
2.50	0.9974	-0.0026	0.0038
3.00	0.9977	-0.0023	0.0038
3.40	0.9980	-0.0020	0.0038
3.50	0.9980	-0.0020	0.0038
4.00	0.9983	-0.0017	0.0038
4.50	0.9987	-0.0013	0.0039
5.00	0.9990	-0.0010	0.0039

Table 3-8 Bias and Bias uncertainty Calculation factor
as a function of fuel diameter (SCALE)

	k-fit as a Function of Fuel Diameter
Intercept	0.9863
Slope	0.0086
	One-Sided Tolerance Band Parameters as a Function of fuel diameter
$\sum(x_i - \bar{x})^2$	0.6040
\bar{x}	1.3405
$S_{P_{fit}}$	0.0027
$\frac{-2}{\sigma^2}$	6.027E-06
S_{fit}^2	1.309E-06
$F_a^{(2, n-2)}$	3.0766
z_{2P-1}	1.6449
γ	0.025
$\chi_{1-\gamma, n-2}^2$	85.4728

Table 3-9 Bias and Bias uncertainty as a function of fuel diameter (SCALE)

diameter	k-fit	bias	bias uncertainty
0.775	0.9963	-0.0037	0.0041
0.820	0.9963	-0.0037	0.0041
0.865	0.9963	-0.0036	0.0041
0.910	0.9964	-0.0036	0.0041
0.955	0.9964	-0.0036	0.0041
1.000	0.9964	-0.0036	0.0041
1.045	0.9965	-0.0035	0.0040
1.090	0.9965	-0.0035	0.0040
1.135	0.9965	-0.0035	0.0040
1.180	0.9965	-0.0035	0.0040
1.225	0.9966	-0.0034	0.0040
1.270	0.9966	-0.0034	0.0040
1.415	0.9967	-0.0033	0.0040

2. MCNP 계산결과 경향 분석

제2장 제3절의 3항에 따라 MCNP Code에 대하여 다음 항목들에 대한 경향을 분석하였다.

- 농축도 (Enrichment; weight % of U²³⁵)
- 연료봉 지름 (Diameter of Fuel Pellet; cm)
- 격자 피치 (Pin Pitch; cm)

※ MCNP에 대한 경향분석이 SCALE 결과와 유사하므로 관련 자료만 기술함.

Table 3-10 Summary of Calculation result (MCNP)

	농축도	격자 피치	연료봉 지름
○ Weighted Linear Least Square Fit			
Intercept	0.9945	1.0000	0.9982
Slope	0.0003	-0.0004	0.0003
○ Linear Correlation Coefficient			
y-bar	0.9954	0.9954	0.9954
x-bar	3.3029	2.1377	3.3013
r ²	0.0501	0.0123	0.0571
○ Student-t test			
Slope Test (t _{score})	2.1598	-0.9879	2.4281
Student-t Compare Value	± 1.9812	± 1.9812	± 1.9812
Result	Statistically Significant	Not Statistically Significant	Statistically Significant
○ Parameter Range			
Minimum	2.35	1.684	1.27
Maximum	4.31	2.54	1.415

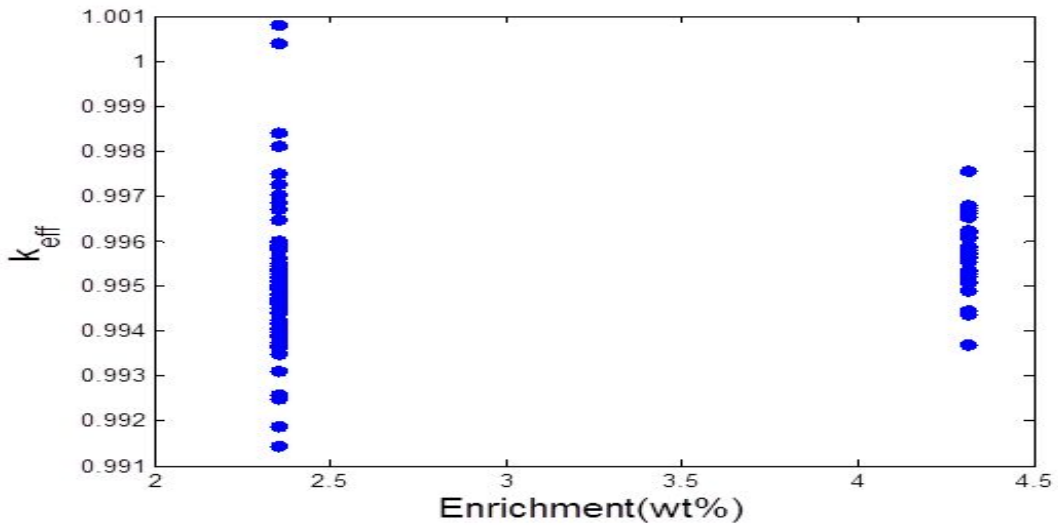


Figure 3-5 Calculated Keff vs. fuel enrichment (MCNP)

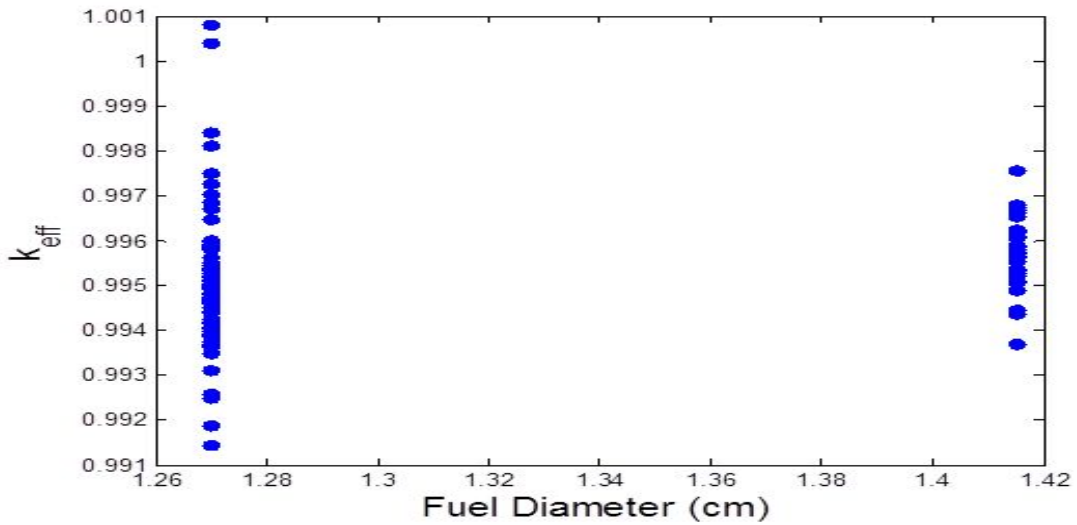


Figure 3-6 Calculated Keff vs. fuel diameter (MCNP)

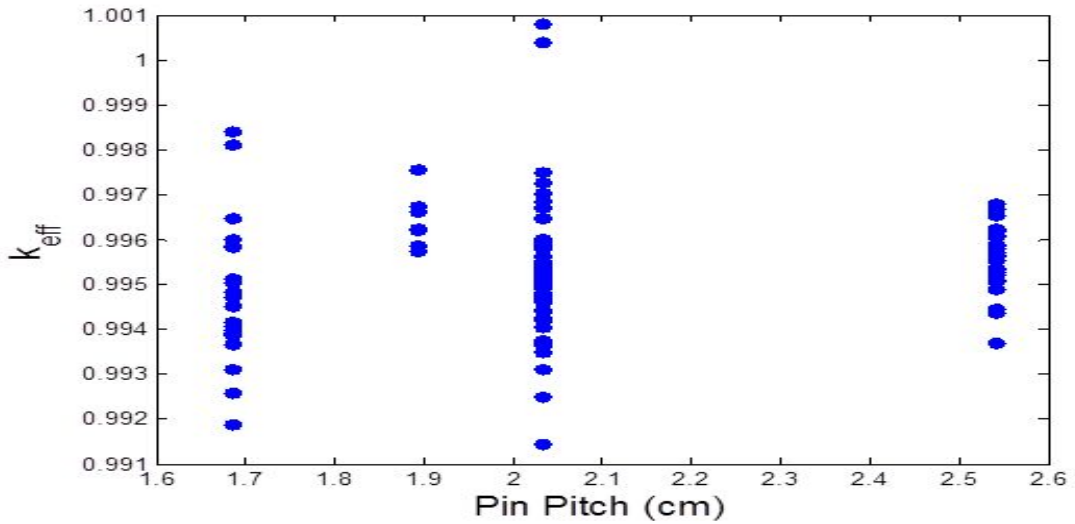


Figure 3-7 Calculated Keff vs. pin pitch (MCNP)

Table 3-11 Bias and Bias uncertainty Calculation factor as a function of enrichment (MCNP)

	k-fit as a Function of Enrichment
Intercept	0.9945
Slope	0.0003
	One-Sided Tolerance Band Parameters as a Function of Initial Enrichment
$\sum(x_i - \bar{x})^2$	110.3614
\bar{x}	3.3029
S_{fit}	0.0027
σ^2	6.013E-06
S_{fit}^2	1.452E-06
$F_a^{(2, n-2)}$	3.0766
z_{2P-1}	1.6449
γ	0.025
$\chi_{1-\gamma, n-2}^2$	85.4728

Table 3-12 Bias and Bias uncertainty as a function of enrichment (MCNP)

농축도	k-fit	bias	bias uncertainty
1.00	0.9948	-0.0052	0.0041
1.40	0.9949	-0.0051	0.0040
1.60	0.9949	-0.0051	0.0040
1.80	0.9950	-0.0050	0.0039
2.00	0.9951	-0.0049	0.0039
2.40	0.9952	-0.0048	0.0039
2.50	0.9952	-0.0048	0.0038
3.00	0.9953	-0.0047	0.0038
3.40	0.9955	-0.0045	0.0038
3.50	0.9955	-0.0045	0.0038
4.00	0.9956	-0.0044	0.0038
4.50	0.9958	-0.0042	0.0039
5.00	0.9959	-0.0041	0.0040

 Table 3-13 Bias and Bias uncertainty Calculation factor
 as a function of fuel diameter (MCNP)

	k-fit as a Function of fuel diameter
Intercept	0.9904
Slope	0.0038
	One-Sided Tolerance Band Parameters as a Function of fuel diameter
$\sum(x_i - \bar{x})^2$	0.6040
\bar{x}	1.3405
$S_{P_{fit}}$	0.0027
σ^{-2}	6.013E-06
S_{fit}^2	1.452E-06
$F_a^{(2, n-2)}$	3.0766
z_{2P-1}	1.6449
γ	0.025
$\chi_{1-\gamma, n-2}^2$	85.4728

Table 3-14 Bias and Bias uncertainty as a function of fuel diameter (MCNP)

연료 지름	k-fit	bias	bias uncertainty
0.775	0.9963	-0.0037	0.0041
0.820	0.9963	-0.0037	0.0041
0.865	0.9963	-0.0037	0.0041
0.910	0.9964	-0.0036	0.0041
0.955	0.9964	-0.0036	0.0041
1.000	0.9964	-0.0036	0.0041
1.045	0.9965	-0.0035	0.0040
1.090	0.9965	-0.0035	0.0040
1.135	0.9965	-0.0035	0.0040
1.180	0.9965	-0.0035	0.0040
1.225	0.9966	-0.0034	0.0040
1.270	0.9966	-0.0034	0.0040
1.415	0.9967	-0.0033	0.0040

3. SERPENT 계산결과 경향 분석

제2장 제3절의 3항에 따라 SERPENT Code에 대하여 다음 항목들에 대한 경향을 분석하였다.

- 농축도 (Enrichment; weight % of U^{235})
- 연료봉 지름 (Diameter of Fuel Pellet; cm)
- 격자 피치 (Pin Pitch; cm)

※ SERPENT에 대한 경향분석이 SCALE 결과와 유사하므로 관련 자료만 기술함.

Table 3-15 Summary of Calculation result (SERPENT)

	농축도	격자 피치	연료봉 지름
○ Weighted Linear Least Square Fit			
Intercept	0.9982	1.0000	0.9982
Slope	0.0003	-0.0004	0.0003
○ Linear Correlation Coefficient			
y-bar	0.9991	0.9991	0.9991
x-bar	3.3013	2.1377	3.3013
r^2	0.0571	0.0123	0.0571
○ Student-t test			
Slope Test (t_{score})	2.4281	-0.9879	2.4281
Student-t Compare Value	± 1.9812	± 1.9812	± 1.9812
Result	Statistically Significant	Not Statistically Significant	Statistically Significant
○ Parameter Range			
Minimum	2.35	1.684	1.27
Maximum	4.31	2.54	1.415

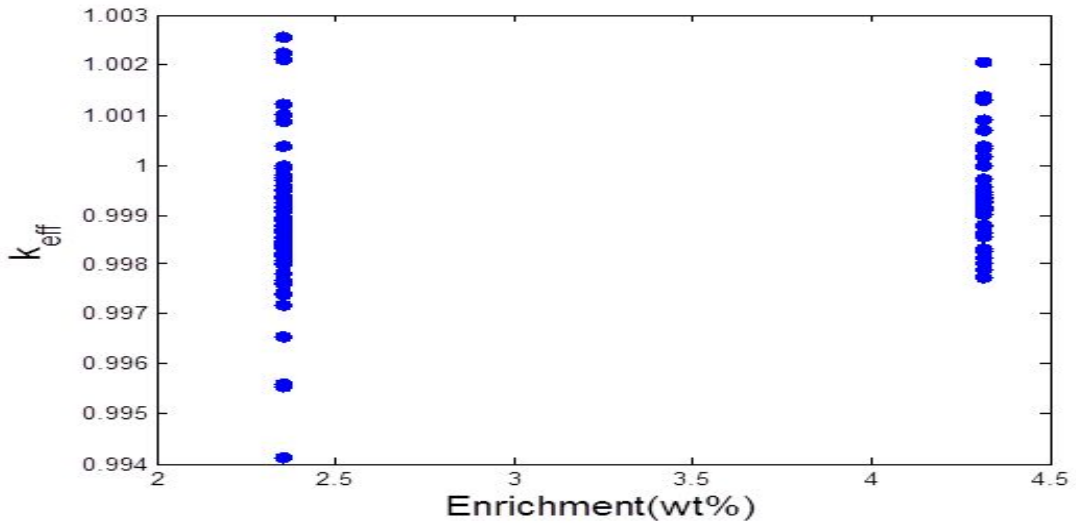


Figure 3-8 Calculated Keff vs. fuel enrichment (SERPENT)

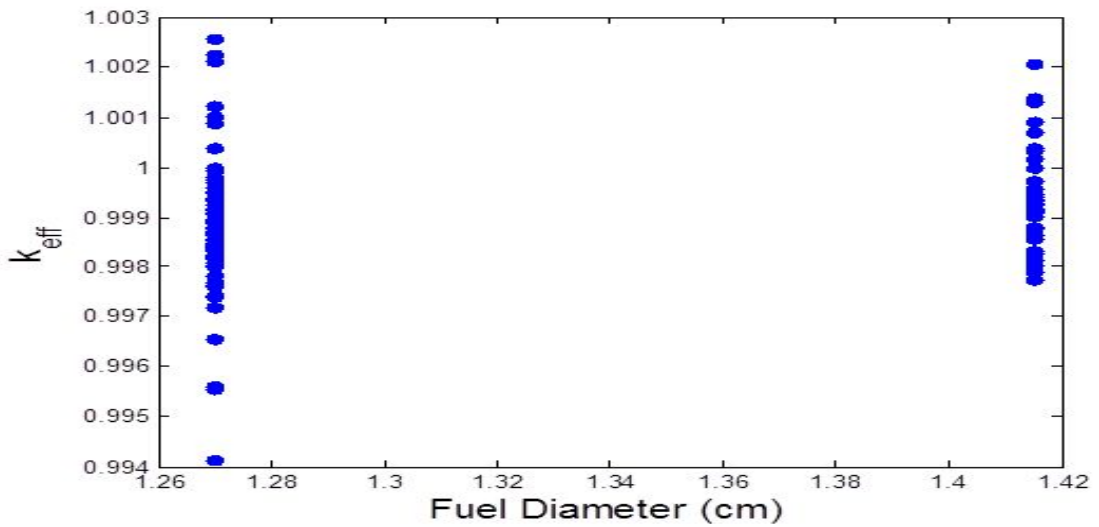


Figure 3-9 Calculated Keff vs. fuel diameter (SERPENT)

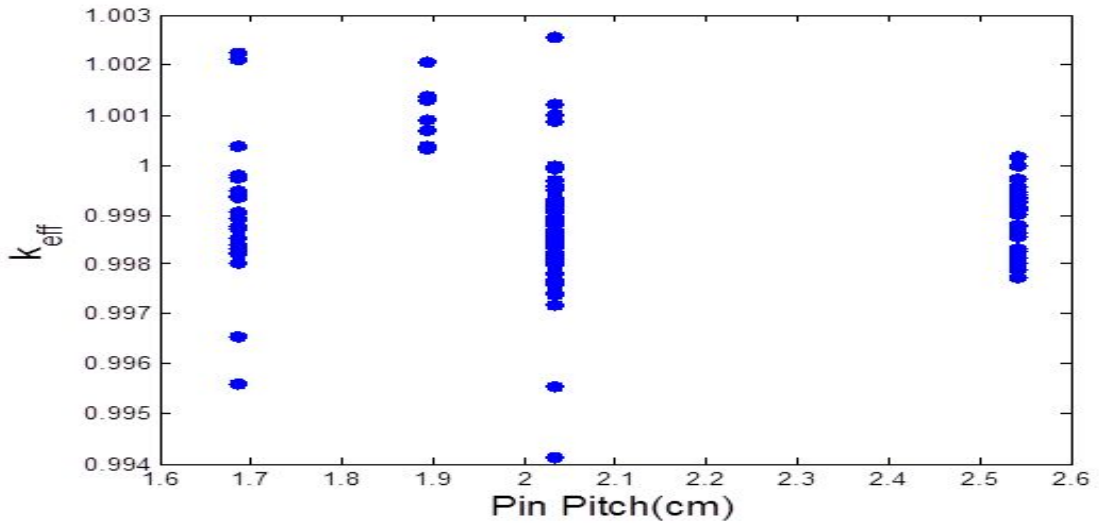


Figure 3-10 Calculated Keff vs. pin pitch (SERPENT)

Table 3-16 Bias and Bias uncertainty Calculation factor as a function of enrichment (SERPENT)

	k-fit as a Function of enrichment
Intercept	0.9982
Slope	0.0003
	One-Sided Tolerance Band Parameters as a Function of initial enrichment
$\sum(x_i - \bar{x})^2$	110.3512
\bar{x}	3.3013
$S_{P_{fit}}$	0.0027
$\frac{-2}{\sigma}$	6.044E-06
S_{fit}^2	1.419E-06
$F_a^{(2, n-2)}$	3.0766
z_{2P-1}	1.6449
γ	0.025
$\chi_{1-\gamma, n-2}^2$	85.4728

Table 3-17 Bias and Bias uncertainty as a function of enrichment (SERPENT)

농축도	k-fit	bias	bias uncertainty
1.00	0.9984	-0.0016	0.0041
1.40	0.9986	-0.0014	0.0040
1.60	0.9986	-0.0014	0.0040
1.80	0.9987	-0.0013	0.0039
2.00	0.9987	-0.0013	0.0039
2.40	0.9989	-0.0011	0.0039
2.50	0.9989	-0.0011	0.0038
3.00	0.9990	-0.0010	0.0038
3.40	0.9992	-0.0008	0.0038
3.50	0.9992	-0.0008	0.0038
4.00	0.9993	-0.0007	0.0038
4.50	0.9995	-0.0005	0.0039
5.00	0.9996	-0.0004	0.0040

 Table 3-18 Bias and Bias uncertainty Calculation factor
 as a function of fuel diameter (SERPENT)

	k-fit as a Function of fuel diameter
Intercept	0.9938
Slope	0.0004
	One-Sided Tolerance Band Parameters as a Function of fuel diameter
$\sum(x_i - \bar{x})^2$	0.6039
\bar{x}	1.3404
$S_{P_{fit}}$	0.0027
σ^{-2}	6.044E-06
S_{fit}^2	1.419E-06
$F_a^{(2, n-2)}$	3.0766
z_{2P-1}	1.6449
γ	0.025
$\chi_{1-\gamma, n-2}^2$	85.4728

Table 3-19 Bias and Bias uncertainty as a function of fuel diameter (SERPENT)

연료 지름	k-fit	bias	bias uncertainty
0.775	0.9963	-0.0037	0.0041
0.820	0.9963	-0.0037	0.0041
0.865	0.9963	-0.0037	0.0041
0.910	0.9964	-0.0036	0.0041
0.955	0.9964	-0.0036	0.0041
1.000	0.9964	-0.0036	0.0041
1.045	0.9965	-0.0035	0.0040
1.090	0.9965	-0.0035	0.0040
1.135	0.9965	-0.0035	0.0040
1.180	0.9965	-0.0035	0.0040
1.225	0.9966	-0.0034	0.0040
1.270	0.9966	-0.0034	0.0040
1.415	0.9967	-0.0033	0.0040

제4장 결론

가압경수로용 핵연료의 습식저장시설 설계에 예상되는 조건들을 포괄하는 115개의 임계실험에 대하여 SCLAE6.1, MCNP와 SERPENT 세 가지 Monte Carlo Code를 적용하여 실험결과를 검증하였다.

모든 임계실험들은 OECD/NEA의 “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”에 수록되어 있다. 결과에 대한 통계적인 분석은 NUREG/CR-6698 “Guide for Validation of Nuclear Criticality Safety Calculation Methodology”의 권고사항을 기준으로 수행하였다.

SCALE6.1, MCNP, SERPENT 세 가지 전산 코드를 통한 임계실험 결과는 k값에 대한 경향성을 적용하지 않은 편이 및 편이 불확실도는 ;

각각 -0.0021 ± 0.0028 , -0.0046 ± 0.0027 , -0.0009 ± 0.0027 이다

또한 농축도, 격자 피치, 연료봉 지름 등 세 가지 항목에 대해 데이터 경향분석을 수행하였다. 경향분석 결과 통계적으로 임계 경향성은 농축도와 연료봉 지름에 대해서만 나타났다. 세 가지 전산코드를 통하여 최대 농축도 5.0w/o의 웨스팅하우스형 핵연료(14x14, 16x16, 17x,17)와 OPR1000 핵연료에 사용되는 지름 0.950cm, 0.970cm, 1.016cm을 적용하였을 때 임계실험에 대한 편이 및 편이 불확실도(Bias and Bias Uncertainty)계산을 통해 Table 4-1, 4-2와 같은 결과를 얻었다.

Table 4-1 Summary of Bias and Bias uncertainty as a function of enrichment

농축도 (w/o)	bias			bias uncertainty		
	SCALE	MCNP	SERPENT	SCALE	MCNP	SERPENT
5.0	-0.0010	-0.0041	-0.0004	0.0039	0.0040	0.0040

Table 4-2 Summary of Bias and Bias uncertainty as a function of fuel diameter

연료 지름 (cm)	bias			bias uncertainty		
	SCALE	MCNP	SERPENT	SCALE	MCNP	SERPENT
0.950	-0.0055	-0.0061	-0.0059	0.0086	0.0086	0.0086
0.970	-0.0053	-0.0060	-0.0059	0.0084	0.0085	0.0085
1.016	-0.0049	-0.0058	-0.0058	0.0080	0.0081	0.0081

위의 계산 결과와 경향성을 반영하지 않은 편이 및 편이 불확실도 값을 비교해 보았을 때 모든 변수 값에 대해서 편이는 음(-)의 값이 나왔으며 편이 불확실도는 경향성을 반영한 데이터에서 더 큰 값이 나왔다.

코드별로 편이, 편이 불확실도, 변수에 따른 경향성의 정도가 각기 다르다. 편이와 편이 불확실도가 큰 코드일수록 더 낮은 USL 값을 가지게 되며 이것은 미임계 상태를 안전하게 유지할 수 있는 최대 임계 계산값이 작다는 것을 의미한다. 또한 경향성이 크다는 것은 변수에 따른 임계도 변화 정도가 크다는 것을 의미한다.

사용후연료저장조와 신연료 저장고의 미임계 유지를 위해 전산코드계산에서의 임계도는 편이와 편이 불확실도, 안전여유도 등을 고려하여 USL보다 낮은 값이 나올 수 있도록 모델링 되어야한다. 임계도를 USL 이하로 만족시키지 못하면 충분한 미임계 여유도를 확보하지 못할 뿐만 아니라 최악의 경우에는 임계에 도달할 수도 있기 때문에 USL 결정은 매우 중요하다.

사용후연료저장조 및 신연료저장고와 조건과 환경이 매우 유사한 임계실험들을 선정하여 모델링한 후 실험결과와 계산결과를 이용한 통계적 분석 방법을 통해 USL을 결정함으로써 임계도 평가 전산코드의 유효성을 검증하였고 저장시설의 조건이 변경될 경우에 상기 코드별 편이 및 편이 불확실도를 반영하여 임계도 평가 해석에 활용함으로써 규제요건 만족여부를 확인하는데 유효하게 적용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. NUREG/CR-6698, “Guide for Validation of Nuclear Criticality Safety Calculational Methodology,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, January 2001.
2. NUREG-1475, “Applying Statistics,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, March 2011.
3. ORNL/TM-2005/39, “SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design,” Version 6.1, ORNL, June 2011.
4. BCC-009, “MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transport code,” Version 6.1, Los Alamos National Laboratory, August 2013.
5. PSG2, “SERPENT: A Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code,” VTT Technical Research Centre of Finland, 2012.
6. “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments,” OECD, NEA, NSC, September 2012.
7. DSS-ISG-2010-01, “Staff Guidance Regarding the Nuclear Criticality Safety Analysis for Spent Fuel Pools,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, October 2011.
8. NEI-12-01, “Guide for Assessing Beyond Design Basis Accident Response Staffing and Communications Capabilities,” Nuclear Energy Institute, May 2012.
9. Tables for Normal Tolerance Limits, Sampling Plans, and Screening.