

‘95 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

CANDU형 원자로에서의 증분격자상수 계산 방법 평가

배창준, 김봉기, 민병주, 정창준, 이상용

한국원자력연구소

요 약

CANDU형 원자로의 노심해석을 위해 핵연료 격자 및 반응도 설비(reactivity devices)에 대한 2군 균정수가 필요하다. 특히 CANDU형 원자로의 노심해석에 있어서 반응도 설비나 구조물은 증분격자 상수(Incremental Cross Section)에 의해 묘사된다. 현재 CANDU형 원자로의 반응도 설비의 증분격자 상수를 계산하기 위해 MULTICELL 코드를 사용하여 계산하고 있다. 그러나 weak absorber에 대해 기존의 증분격자 상수를 이용하여 계산한 반응도가는 시운전(Phase-B)조건에서의 노물리 시험치보다 다소 과소평가하고 있다. 본 연구에서는 증분격자 상수 계산 방법의 개선 방향을 모색하기 위해 SHETAN 및 MCNP 코드로 단일 격자에서의 반응도가를 계산하여 비교, 평가하였다. MCNP 계산의 결과는 조정봉(Adjuster rods)과 흡수봉/정지봉 (Mechanical Control Absorber/Shutoff rod)은 MULTICELL의 계산 결과보다 적으며, 경수영역 조절기(Liquid Zone Controller)는 크게 나타났다. 또한 SHETAN 코드를 이용한 결과는 MULTICELL의 결과보다 약간 크게 나타났다.

1. 서 론

현재 반응도 설비의 증분격자 상수는 MULTICELL⁽¹⁾ 코드를 사용하여 계산한다. MULTICELL에 필요한 핵연료, 핵연료 환형 및 감속재 지역에 대한 핵적 인자들은 POWDERPUFS-V⁽²⁾로 계산된다. POWDERPUFS-V는 Westcott cross section convention이 사용되기 때문에 중성자 스펙트럼의 특성은 Maxwellian 분포와 거의 같아야만 한다. 이것은 POWDERPUFS-V가 천연우라늄을 사용하는 핵연료에만 적용됨을 의미한다. MULTICELL 모델에서 확산 방정식의 해를 구하기 위해, 2가지 옵션이 사용 가능하다. 첫 번째 옵션인 균일 source 옵션에서는 감속 source가 균일하고, 두 번째 옵션에서는 epithermal과 열중성자속이 계산된다. 첫 번째 옵션은 epithermal 중성자속의 변화가 거의 없는 반응도 설비나 지역에 적용되며, 두 번째 옵션은 반응도 설비 (경수 영역 조절기) 로 인해 epithermal 중성자속 분포가 크게 바뀔 때 사용된다. 핵연료 및 강한 흡수체와 같이 확산 이론이 적용되지 않은 물체에 대해서 이들의 영향을 고려하기 위해 current 대 중성자속 비율 (current-to-flux ratio ; CFR) 경계 조건이 사용된다. 이들은 2군 에너지를 갖는 중성자에 대

해 핵연료나 반응도 설비의 내부면에서 수송이론 혹은 해석적 계산 방법으로 부터 구할 수 있다. 반응도 설비 표면에서의 CFR은 CFR 계산 전용코드인 MULTCFR⁽³⁾을 사용하여 계산되었다. 또한 MULTCFR에 필요한 반응도 설비 각 지역에서의 상대 중성자속은 WIMS 코드로 계산되었다.

WIMS-AECL⁽⁴⁾과 SHETAN⁽⁵⁾ 코드를 이용하여 증분격자 상수를 계산할 때에는 각각의 반응도 설비의 Material Cross Section은 WINFRITH 69 그룹 라이브러리를 사용한 WIMS-AECL 코드를 이용하여 계산하였고, 다군 단면적은 WIMCORE 코드를 이용하여 균축약을 하고, 반응도 설비가 삽입된 supercell은 SHETAN 코드로 모델링하여 계산을 수행하였다.

또한 MULTICELL과 SHETAN으로 계산한 반응도가를 검증하기 위해 MCNP⁽⁶⁾를 이용하여 반응도가를 계산하였다. MCNP코드(Monte Carlo N-Particle Transport Code System)는 중성자, 광자, 전자 또는 이들을 coupling하여 계산할 수 있는 몬테칼로 코드이다. 임계계산 및 fixed source를 포함한 시스템에서의 다양한 양들을 계산해 낼 수 있으며 복잡한 기하학적 모델을 연속에너지 단면적 자료를 이용하여 3차원 계산이 가능하다.

2. 증분격자 상수 계산 방법 및 모델

노심내에는 상당히 많은 반응도 설비가 존재하기 때문에 노심내에서 이들을 별개로 묘사하기는 불가능하다. 따라서 반응도 설비의 특성은 반응도 설비의 총 길이에 따라 상당히 큰 region으로 smear된다. 이러한 region의 크기는 임의로 정해지지만 일반적으로 그 크기는 $1/2$ lattice pitch \times $1/2$ lattice pitch \times $1/2$ bundle length이다. 이렇게 smear된 region의 특성은 보통 supercell 계산으로 구해진다. 이러한 supercell 계산은 조정봉(Adjuster rods), 정지봉(Shutoff rods), 경수 영역 조절기(Liquid zone controllers) 및 구조물(Structure materials)에 대해 수행된다. 이렇게 구해진 증분격자 상수는 반응도 설비가 smear된 노심 region의 표준 cell 격자 상수에 더해진다. Supercell 코드로는 현재 MULTICELL이 노심설계코드로 사용되고 있으며, SHETAN도 비교 계산용으로 사용되고 있다.

2.1 MULTICELL 코드를 이용한 증분격자 상수 계산

MULTICELL은 supercell내에서 중성자 반응율과 출력 분포를 계산한다. Supercell은 특별한 크기 및 위치를 갖는 원자로심의 한 부분이며, 핵연료, 감속재, 핵연료 채널 그리고 원자로 구조물로 구성되어 있다. MULTICELL 코드의 출력은 supercell에 대한 중성자속 가중치로 평균된 중성자 격자 상수 및 반응도 설비의 유·무에 따른 격자 상수의 변화를 보여 준다. 증분격자 상수는 RFSP 코드내에서 중성자 확산 방정식의 해를 구하는 데 사용되는 입력자료이다. 즉 이것은 유한 차분 모델에서 반응도 설비를 포함하는 지역에 대한 격자 상수의 차이를 제공한다.

MULTICELL에서 해를 구하기 위해 사용되는 방법은 반응도 설비의 특성에 따라 다르다. 중수나 지르칼코이와 같이 중성자 흡수율이 작은 (산란율의 5% 이내) 물체에 대해서는 확산 이론이 사용되었으며, 핵연료 채널이나 카드뮴 혹은 강철을 포함하는 반응도 설비와 같이 중성자 흡수율이 큰 지역내에서는 적분 수송 이

론이 사용되었다. 이런 경우의 계산은 POWDERPUFS-V 혹은 WIMS와 같은 격자 코드로 수행되었다. 그리고 이런 계산의 결과는 중성자 흡수율이 크지 않은 지역내에서 중성자 확산 방정식의 해를 구할 때 MULTICELL에서 사용되는 경계 조건으로 변환된다.

핵연료의 묘사는 조정봉, 정지봉 그리고 경수 영역 MULTICELL 모델에서 똑같다. 핵연료의 주변 길이 (POWDERPUFS-V에서 균질 지역)는 MULTICELL 모델에서 보전된다. 체적에서의 차이 (4π 인자)는 핵연료 환형 체적을 증가시킴으로써 고려된다. 이런 식으로 감속재 체적도 보전된다. POWDERPUFS-V에서 구한 핵연료 환형 격자 상수는 증가된 체적을 고려하기 위해 조정된다. 균질 핵연료 지역의 경계에서의 CFR은 POWDERPUFS-V에서 구하며, 중성자속 반복 계산에서 사용된다.

조정봉과 정지봉은 MULTICELL 모델에서 반응도 설비 주변에 대해서는 CFR이 사용된다. 이것은 WIMS 코드를 경유하여 MULTICFR로 계산된다. 이 CFR은 cell의 나머지 부분에 대해 확산 방정식의 해를 구하는데 있어서 내부 경계 조건으로 사용된다. 핵연료의 경우에서 처럼, 반응도 설비 주변의 보전은 감속재의 체적에 있어 차이가 생기는 데, 이는 핵연료 환형 지역을 증가시킴으로써 고려된다. 경수 영역 조절기 (ZCU)의 경우, 확산 방정식의 해는 반응도 설비에서 구해지고, 경수 영역의 체적이 보전된다.

그림 1은 현재 증분격자 상수를 계산하기 위해 사용되는 전산코드 체계를 도식적으로 보여주고 있다. 그림 2는 반응도 설비의 전형적인 MULTICELL 모델을 보여준다.

2.2 WIMS-AECL과 SHETAN 코드를 이용한 증분격자 상수 계산

MULTICELL 계산방법의 정확성 여부를 평가하기 위해 WIMS-AECL과 SHETAN 코드를 이용한 증분격자 상수 계산이 수행되었다.

WIMS-AECL 계산에서는 WINFRITH 69 Group library를 사용하였으며, 조정봉 및 정지봉에 대해서는 6 group, 경수영역 조절기에 대해서는 25 group 계산을 수행하였다. 6 및 25 group은 최종적으로 4 group으로 축약되었다. WIMS-AECL로 계산된 물질별 단면적을 SHETAN 코드에 이용하기 위해 WIMCORE 코드를 사용하여 지역별 단면적을 계산한다. 이 때, 군 축약은 WIMS-AECL 계산에서 수행되었으므로 WIMCORE 계산에서는 지역별 군정수만을 계산한다. 반응도 설비 및 구조물은 두개의 핵연료 채널 사이에 수직으로 위치해 있다. SHETAN 모형은 대칭을 고려하여 $1/8$ lattice bundle 크기로 ($1/2$ lattice pitch \times $1/2$ lattice pitch \times $1/2$ bundle length) 모형화하였으며, 그림 3에 나타내었다.

2.3 MCNP 코드를 이용한 단일격자에서의 반응도가 검증 계산

이 계산에 사용한 모델은 다발하나를 격자셀로 한 $28.575 \text{ cm} \times 28.575 \text{ cm} \times 49.53 \text{ cm}$ 의 dimension과 reflective boundary condition을 갖는다. 또 이 모델은 핵연료, fuel annulus, 냉각재와 감속재 및 반응도 설비로 되어있으며, 각 반응도 설비는 다발에 수직으로 위치한다.

단면적 라이브러리는 ENDF/B-V에서 가져온 연속 에너지 단면적을 이용하였다. 임계도를 계산하기 위하여 source history수 3000번, cycle수 215회 수행하여 k-infinity 값을 구하였다.

3. 계산 결과 및 논의

단일격자에서의 각 반응도 설비에 대한 반응도가가 표 1에 정리되어 있다. SHETAN 코드로 계산한 단일격자에서의 반응도가는 MULTICELL의 계산 결과보다 약간 크게 나타났다. MCNP 계산의 결과는 조정봉과 흡수봉은 MULTICELL의 계산 결과보다 적으며, 경수영역 조절기는 크게 나타났다. 현재 CANDU형 원자로의 반응도 설비중 조정봉의 반응도가가 MULTICELL 코드로 계산한 결과는 표 2에서 보는 바와 같으며 이는 실제 원자로 물리시험보다 약 10% 정도 적게 나타나고 있다.

Weak absorber인 조정봉은 단일격자에서의 반응도가 측면에서는 잘 맞지만, westcott cross section convention을 사용하는 확산계수로 인해 노심내 반응도가 계산 결과에 영향을 받을것으로 예상된다. 또한 경수영역 조절기의 경우 MULTICELL의 확산 방정식에서 epithermal 및 열중성자속 계산 옵션의 사용으로 다소 과소평가하는 문제점이 예상된다. Strong absorber(MCA/SOR)의 경우 absorber의 critical thickness를 넘어서는 것으로 예측되므로 노심 계산에 큰 영향을 주지 않을 것으로 예측된다.

4. 결론 및 향후 추진 과제

현재 반응도 설비의 증분격자 상수는 POWDERPUFS-V, WIMS-AECL, MULTCFR 및 MULTICELL등의 코드를 사용하여 생산하고 있어 그 절차가 복잡할 뿐만 아니라, 계산 체계가 천연 우라늄의 사용에 맞도록 구축되어 있기 때문에 새로운 핵연료 및 원자로에 적용할 때 많은 변경이 필요하다. 따라서 앞절에서 논의된 문제점들을 보다 정확히 평가하여 새로운 계산체계를 구축함으로써 기존의 증분격자 상수보다 정확한 자료를 생산함으로써 노심계산의 오차를 줄이는 것이 요구된다.

5. 참고 문헌

- 1) A.R. Dastur, et al, "MULTICELL User's Manual", TDAI-208, 1979 December.
- 2) D.B. Miller and E.S.Y. Tin, "POWDERPUFS-V User's Manual", TDAI-31 Part 2 of 3, 1976 March.
- 3) A.C. Mao and D.A. Jenkins, "MULTCFR Program Description and User's Manual", TTR-350, 1991 December.
- 4) J.V. Donnelly, "WIMS-CNRL, A User's Manual for the Chalk River Version of WIMS", AECL-8955, 1986 January.
- 5) H.C. Chow, "SHETAN - A Three-dimensional Neutron Transport Program User's Manual", TDAI-261, AECL (1981)
- 6) J.F. Briesmeister(Editor), "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", Version 4A, La-12626-M, Nov. 1993.

표 1. 각 반응도 설비에 대한 반응도가 계산

	MCNP ($\Delta \rho$)	MULTICELL ($\Delta \rho$)	SHETAN ($\Delta \rho$)
ADJ A-IN	0.116	0.118	0.120
ADJ A-OUT	0.095	0.097	0.098
ADJ B-TYPE	0.176	0.180	0.189
ADJ C-IN	0.152	0.158	0.164
ADJ C-OUT	0.071	0.070	0.071
ADJ D-TYPE	0.103	0.105	0.107
MCA/SOR	0.703	0.755	1.070
ZCE 1	0.034	0.023	0.032
ZCE 2	0.017	0.007	0.017
ZCE 3	0.053	0.041	0.049
ZCF 1	0.263	0.235	0.277
ZCF 2	0.272	0.241	0.283
ZCF 3	0.256	0.228	0.271

표 2. 시운전 (Phase-B) 조건에서의 조정봉에 대한 노물리 시험치 및 예측치의 비교

	시험치 (mk)	예측치 (mk)	% 오차
Wolsong	14.68		
Gentilly-2	14.57		
CORDOBA	14.44		
평균	14.56	13.19	9.4

