

CANDU 6 원전의 압력관 변형에 따른 노심특성 평가

Assessment of Pressure Tube Creep Effect on Core Characteristics for CANDU-6 Reactors

감성천¹, 김만웅¹, 김효정¹, 홍인섭², 김창효²

¹ 한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

² 서울대학교, 서울특별시 관악구 신림9동 산 56-1번지

요 약

국내 가동중인 중수로의 수령이 증가함에 따라 경년열화에 따른 안전성 저하에 대한 우려가 제기되고 있으며, 특히 가동연수가 20년을 초과하고 있는 월성 1호기의 경우, 경년열화에 따른 압력관(Pressure Tube) 크립(Creep)현상과 처짐(Sagging)현상이 발생하여 노심 안정성에 부정적인 영향을 초래하고 있다. 특히 크립현상이 발생하면 압력관의 물리적 반경이 증가하여 핵연료 다발을 지나는 냉각재 유량이 증가하므로 노심 반응도에 직접적으로 영향을 미치게 되고, 냉각재상실 사고 등과 같은 과도상태 사고시 높은 노심 출력 증가를 유발한다.

그러나 본 논문에서는 크립현상이 노심 안정성에 미치는 영향을 보수적으로 평가하기 위하여 CANDU-6 원자로의 초기노심에서 크립이 생긴다고 가정하여 이에 대한 반응도 영향을 고찰하였다. 따라서 본 논문에서는 서울대학교에서 개발중인 3차원 중수로 노심코드인 CANNOD (CAndu Neutronics NODal code) 코드를 활용하여 압력관 크립현상이 노심 반응도에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 WIMS-AECL 격자코드를 이용하여 크립현상이 격자 반응도에 미치는 영향을 평가하였으며, 격자 및 노심 계산의 결과, 압력관의 크립률(Creep Ratio)의 증가는 냉각재 상실사고시 기포반응도(Void Reactivity) 증가를 초래하여 원자로 안전성에 부정적인 것으로 평가되었다.

1. 서 론

가동중 중수로(CANDU형)의 수령이 증가함에 따라 구조물, 계통, 기기 등의 경년열화로 인해 안전성 저하에 대한 우려가 대두되고 있다. 이에 CANDU형 원전 종주국인 캐나다에서는 경년열화에 따른 안전성 확보가 주요한 현안으로 제기되고 있다. 이에 캐나다 규제기관인 CNSC(Canadian Nuclear Safety Commission)에서는 일반안전현안(GAI: Generic Action Items)과 자체 안전연구의 일환으로 CANDU 노

심 안전성 평가코드의 개발과 함께 가동중 노심의 경년열화에 대한 평가를 수행중에 있다 [1]. 한편 국내에서도 우리나라 최초의 CANDU형 원전인 월성 1호기의 가동연수가 20년을 초과하고 있으며, 특히 압력관의 크립률 증가에 따라 압력관을 진량 교체할 예정으로 있다.

CANDU형 원전은 설계 특성상 운전 중에 핵연료를 교체(On-power Refueling)할 수 있도록 핵연료 채널이 수평적으로 설계되어 있다. 그러나 핵연료 채널의 압력관이 크립현상으로 신장하게 되면 유로단면적이 증가하게 되어 사고시 기포유량 증가로 인한 기포 반응도가 증가하게 되어 노심 안전성에 부정적인 영향을 초래할 수도 있다. 즉 압력관에 크립이 발생하게 되면 반경방향의 기하학적 변형으로 인해 핵연료 다발을 지나는 냉각재 유량 단면적이 증가하게 되므로 노심 반응도에 직접적으로 영향을 미치게 되고, 냉각재상실 사고 등과 같은 과도상태 사고시 높은 노심 출력 증가를 유발한다. 따라서 본 연구에서는 크립현상이 노심 안정성에 미치는 영향을 보수적으로 평가하기 위하여 CANDU-6 원자로의 초기노심에서 크립이 생긴다고 가정하여 압력관의 크립현상이 노심 반응도 변화에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 압력관 변형에 의한 노심영향 평가

압력관의 크립현상이 노심 반응도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 한국원자력안전기술원의 위탁으로 서울대학교가 개발한 노심코드인 CANNOD(CAndu Neutronics NODal code)를 이용하여 노심 과도사고시 크립현상이 노심 반응도에 미치는 영향을 평가하였다. 상세 평가 방법론 및 결과는 다음과 같다.

2.1 격자 반응도 영향평가

일반적인 CANDU 6형 격자는 그림 1과 같이 구성되어 있으며 압력관(Pressure Tube) 내부로 중수 냉각재가 흐르도록 설계되어 있다. 정상상태 37봉 핵연료 격자 구조물의 외곽 반경과 핵연료 격자의 조성 성분은 표 1과 표 2와 같다. 한편 핵연료 노후화에 의하여 압력관의 크립이 발생하게 되면 격자 내 압력관의 체적은 일정하게 유지되나 내경과 외경은 동시에 증가하게 된다. 압력관 크립에 따른 내경과 외경의 변화는 표 3과 같이 고려하였다.

압력관 크립에 의한 격자 반응도 영향을 평가하기 위하여서는 WIMS-AECL 코드[1]를 이용하여 초기 핵연료다발에 대하여 크립에 의한 격자 반응도를 평가하였으며, 노심 계산을 위하여서는 2군 핵연료 단면적을 생성하였다. 초기 핵연료다발은 농축도 0.71%의 천연(natural) 우라늄 핵연료 다발과 0.52%의 감손(depleted) 우라늄 핵연료 다발을 선정하였으며, 크립이 격자 반응도에 미치는 영향 평가를 위하여서는 각각의 핵연료 다발에 대하여 0 ~ 10%의 크립률(creep ratio)을 적용하여 반응도 영향을 평가하였다.

초기 노심 운전 시 잉여반응도를 제어하는 방법 중 하나는 노심내에 보론을 삽입하여 부의 반응도를 공급하는 것으로 초기 노심의 경우 일정량의 보론이 삽입된 상태로 운전되기도 한다. 이를 고려하기 위하여 표 4와 표 5에서는 각각 격자 내에 보론이 없을 경우 및 8ppm 정도의 보론이 삽입된 경우로 나누어서 크립율(creep ratio)에 따른 무한증배계수(K_{∞}) 변화 및 반응도 변화를 나타내었으며, 이러한 조건에서 냉각재 누출사고시 노심내 기포 반응도에 대한 영향도 평가하였다.

평가결과 무한증배계수는 그림 2와 같이 냉각재 누출이 없는 상태에서는 크립율이 증가함에 따라 선형적으로 감소하여 안전성에는 긍정적이나 경제성에서는 부정적인 것으로 평가된다.

크립률 증가에 따른 천연우라늄 핵연료 격자의 기포반응도 변화는 그림 3과 같이 크립율이 증가할수록 기포반응도가 거의 선형적으로 증가하며 증가 비율은 보론 농도가 높을수록 크게 나타났다. 보론 농도 8ppm인 격자에서의 기포반응도는 크립이 발생하지 않는 경우, 20.841mk로 나타났으며 크립율이 10%인 경우 27.976mk로 나타나 그 차이가 약 7mk로 매우 크게 나타나 크립과 냉각재상실이 동시에 나타날 경우 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 실 노심에서는 크립 및 기포반응도가 3차원적으로 분포되어 나타나기 때문에 보다 정확한 평가를 위하여서는 3차원 노심계산이 필요하다.

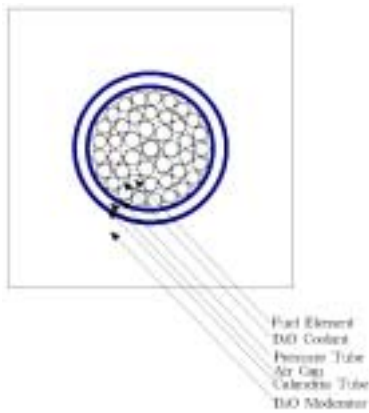


그림 1. 37봉 핵연료 격자구조

표 1. 37봉 핵연료 격자 구조물의 외곽 반경

Material	Radial Boundary(cm)
COOLANT	5.1689
PT	5.6032
GAP	6.4478
CT	6.5875
FUEL	0.6122
CLAD	0.654

* Lattice Half-Pitch 14.2875 (cm)

표 2. 37봉 핵연료 물질 조성

Material	밀도[g/cm ³]	Weight Fraction (%)								SUM
FUEL	10.38635280	U235	0.71097100	U238	99.28362000	O16	13.44251000	U234	0.00540800	113.44250900
CLAD	6.39180000	ZR90	50.51430000	ZR91	11.01590000	ZR92	16.83810000	ZR94	17.06390000	98.49817201
		ZR96	2.74908000	FE54	0.01239000	FE56	0.19261200	FE57	0.00441000	
		CR50	0.00476539	CR52	0.08379000	CR53	0.00950000	CR54	0.00236500	
		NI58	0.00476539	NI60	0.00183561	NI61	0.00007980	NI62	0.00025438	
		NI64	0.00006482	B10	0.00005962					
COOLANT	0.80799600	H1	0.08111111	D2	19.85400000	O16	80.06488889			100.00000000
PT	6.50410000	ZR90	50.06730000	ZR91	10.91850000	ZR92	16.68910000	ZR94	16.91290000	99.95081132
		ZR96	2.72475000	NB93	2.58000000	FE54	0.00276002	FE56	0.04290660	
		FE57	0.00098238	CR50	0.00035142	CR52	0.00677694	CR53	0.00076836	
		CR54	0.00019128	NI58	0.00238270	NI60	0.00091781	NI61	0.00003990	
		NI62	0.00012719	NI64	0.00003241	B10	0.00002431			
GAP	0.00140000	HE4	100.00000000							100.00000000
CT	6.40030000	ZR90	50.52820000	ZR91	11.01900000	ZR92	16.84270000	ZR94	17.06860000	98.49801152
		ZR96	2.74983000	FE54	0.00796500	FE56	0.12382200	FE57	0.00283500	
		CR50	0.00434500	CR52	0.08379000	CR53	0.00950000	CR54	0.00236500	
		NI58	0.03744230	NI60	0.01442260	NI61	0.00062700	NI62	0.00199870	
		NI64	0.00050930	B10	0.00005962					
ENDCAP		CLAD	0.33000000	COOLANT	0.53000000					
MODERATOR	1.08506460	H1	0.01900333	D2	19.96579400	O16	80.01520267			100.00000000

* Library : ENDF/B-VI

표 3. Creep 발생시 Pressure Tube의 반경 변화

Creep (%)	Innter Radius(cm)	Outer Radius(cm)
0.0	5.1689	5.6032
2.5	5.2981	5.7226
5.0	5.4273	5.8425
7.5	5.5566	5.9627
10.0	5.6858	6.0833

표 4. 무 보론 운전시 Creep에 따른 WIMS-AECL 격자 계산

Creep(%)	K-INF Cooled		K-INF Voided		Creep Reactivity(mk)	Void Reactivity(mk)
	NAT	DEP	NAT	DEP	NAT	NAT
0.0	1.11678	0.98129	1.13804	1.00144	-	16.728
2.5	1.11445	0.97914	1.13736	1.00084	-1.872	18.075
5.0	1.11247	0.97732	1.13683	1.00035	-3.469	19.262
7.5	1.11061	0.97560	1.13629	0.99987	-4.975	20.349
10.0	1.10869	0.97384	1.13566	0.99930	-6.534	21.420

표 5. 보론 8ppm 삽입 운전시 Creep에 따른 WIMS-AECL 격자 계산

Creep(%)	K-INF Cooled		K-INF Voided		Creep Reactivity(mk)	Void Reactivity(mk)
	NAT	DEP	NAT	DEP	NAT	NAT
0.0	1.04511	0.91295	1.06838	0.93490	-	20.841
2.5	1.04241	0.91048	1.06787	0.93445	-2.478	22.872
5.0	1.04006	0.90834	1.06746	0.93407	-4.646	24.680
7.5	1.03785	0.90633	1.06704	0.93369	-6.693	26.358
10.0	1.03563	0.90430	1.06653	0.93324	-8.759	27.976

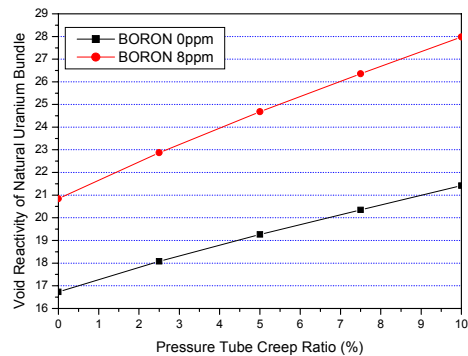
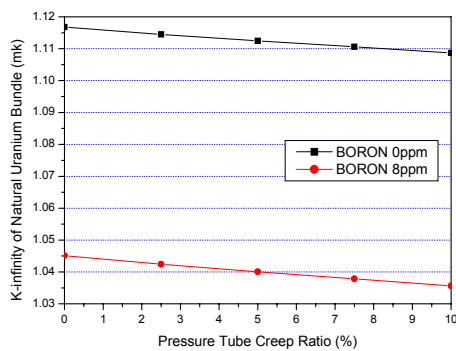


그림 2. Creep에 따른 무한증배계수 변화

그림 3. Creep에 따른 Void Reactivity 변화

2.2 노심 안전성 영향평가

크립현상이 노심 안정성에 미치는 영향을 보수적으로 평가하기 위하여 CANDU-6 원자로의 초기노심에서 크립이 생긴다고 가정하여 그림 4와 같이 CANDU-6원자로의 초기 노심을 대상으로 3차원 노심계산을 수행하였다. 핵연료채널은 12개의 천연우라늄 핵연료 다발로 구성된 경우(Type1)와 10개의 천연우라늄 핵연료 다발 및 2개의 감손우라늄 핵연료 다발로 구성된 경우(Type2 와 Type3)의 3가지 종류로 구분하였다. 해석 조건은 보론 농도가 6.3 ppm이며 반응도 제어봉(Adjuster Rod)이 노심내에 삽입되어 있고, 흡수봉(Mechanical Control Absorber) 및 정지봉(Shut-off Rod)은 인출되어 있으며 액체영역제어기(Liquid Zone Controller)의 수위는 49.60%로 가정하여 정상 운전시의 임계 상태를 구성하였다.

냉각재 상실사고시 노심 반응도 영향을 평가하기 위해서는 그림 4와 같은 전체 노심에 대한 경우와 그림 5와 같이 두개의 냉각재 순환 loop중 하나가 완전히 상실된 경우 및 checker board 형태로 냉각재가 상실된 경우를 대상으로 평가하였다.

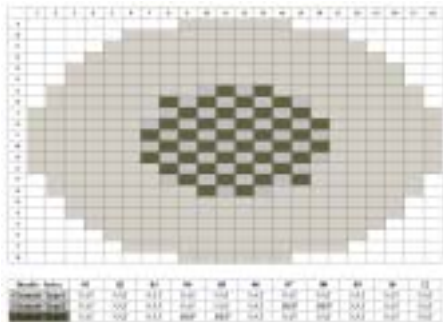


그림 4. Loading Pattern of Fresh Core

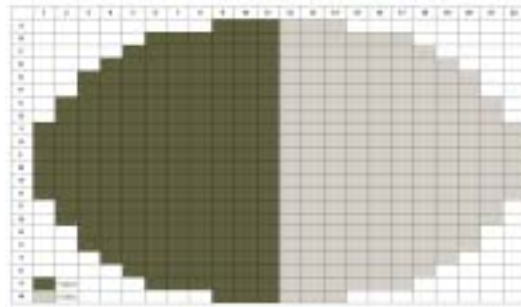


그림 5. Half-Core Voided Pattern

표 6에서는 4,560개 핵연료 다발 전체에 대하여 균일하게 2.5%, 5.0% 및 7.5% 크립이 발생한 경우를 가정하여 정상상태 및 냉각재상실시의 노심 유효증배계수(K_{eff}) 변화를 평가하였다. 그러나, 실제 노심의 경우는 핵연료 다발의 출력 분포에 따라서 공간적 크립 분포를 가지게 되며 이러한 분포는 현재까지는 실험자료가 없는 실정이다. 따라서 아래와 같은 조건을 이용하여 가상의 크립분포를 생성하였으며 계산 결과는 표 7과 같다.

- 핵연료 다발의 공간적인 출력 분포 : Time-averaged 계산으로부터 유도.
- 크립분포 : Time-averaged 핵연료다발 출력이 평균 핵연료다발 출력의 $\pm 1\sigma$ 범 위일 때는 2.5% 크립률을 가정하고, 1σ 보다 큰 영역에서는 5.0%, 그리고 나머지 영역에서는 0.0% 적용.

그림 6은 정상적인 냉각이 일어나고 있는 노심에서 크립률이 증가할 때 노심 반응도 변화를 나타낸 그림으로 크립이 없는 기준노심에 대하여, 노심 전체에서 2.5% creep이 발생한 경우와 5.0% creep이 발생한 경우는 각각 -2.691mk, -5.021mk의

반응도 감손을 보였다.

그림 7은 크립률 증가에 따른 기포반응도 변화를 나타낸 것이며 그림 8은 크립률 증가에 따른 기포 반응도를 크립이 발생하지 않은 노심에서의 기포반응도를 기준으로 하여 그 차이로 나타낸 것이다. 이 중 가상의 공간적 크립분포를 가정하고 두 개의 냉각재 계통중 하나의 계통이 완전히 상실될 경우(Half-Core Voided with Creep Pattern)의 기포 반응도는 크립이 발생하지 않은 노심에 비해 약 2.633mk 정도 증가하는 것으로 나타나 약 18%정도 증가를 보였다.

표 6. Creep 및 냉각재 상실에 따른 노심 유효증배계수

Creep(%)	Keff (Cooled)	Keff (Full Voided)	Keff (Half Voided)	Keff (CheckerB Voided)
0.0	1.00000	1.02232	1.01474	1.01115
2.5	0.99732	1.02190	1.01394	1.00963
5.0	0.99501	1.02155	1.01327	1.00833
7.5	0.99283	1.02121	1.01266	1.00711

* BORON : 6.3 ppm, LZCR : 49.60% Filled

표 7. Creep 분포에 따른 노심 유효증배계수

Creep(%)	Keff (Cooled)	Keff (Half Voided)	Keff (CheckerB Voided)
0.0	1.00654	1.02244	1.01786
Pattern(1)	1.00295	1.02147	1.01582

(1): Bundle Power가 평균의 $\pm 1\sigma$ 범위에서는 2.5% creep 을 가정하고,

1σ 보다 큰 region 에서는 5.0%, 그리고 나머지 영역에서는 0.0% 적용.

* Bundle 조건 : 모두 natural uranium bundle로 가정함.

* BORON : 6.3 ppm, LZCR : 49.60% Filled

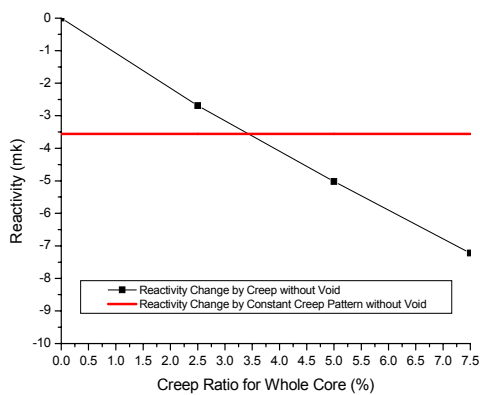


그림 6. Creep Ratio에 따른 노심반응도

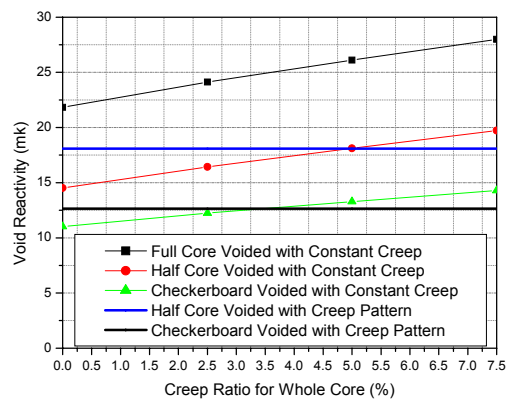


그림 7. Creep Ratio에 따른 Void Reactivity

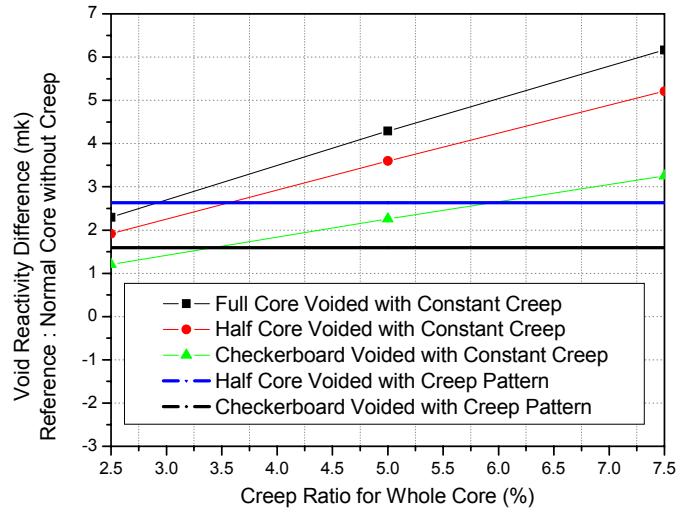


그림 8. Creep Ratio에 따른 Void Reactivity 차이

3. 결 론

본 연구에서는 압력관의 크립현상이 노심 안전성에 대한 영향을 보수적으로 평가하기 위하여 CANDU-6 초기노심을 대상으로 선택하였다. 이를 위해 WIMS-AECL 격자코드와 한국원자력안전기술원의 위탁으로 서울대학교가 개발중인 3차원 중수로 노심코드인 CANNOD를 이용하여 크립현상이 노심 반응도에 미치는 영향을 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 격자계산 및 노심계산의 결과, 크립률이 증가하면 노심 반응도는 선형적으로 감소하는 현상을 보였다. 한편, 냉각재상실이 일어날 경우는 크립률이 증가할수록 기포 반응도가 증가하여 원자로 안전성에 부정적인 것으로 평가된다.
- 가상의 공간적 크립분포를 가정한 초기 노심에서 두 개의 냉각재 계통중 하나의 냉각재 계통이 완전히 상실된 경우의 기포반응도는 크립이 발생하지 않은 노심에 비해 약 2.633mk 정도 증가하는 것으로 나타나 약 18%정도 증가를 보였다.
- 냉각재상실 사고 발생 시 기포반응도 증가는 증가율에 비례하여 과도상태 노심 출력섭동(pulse)을 증가시키게 되므로 안전성에 부정적 영향을 줄 수 있다.

향후 연구에서는 가동중 중수로를 대상으로 압력관 크립상태 크립현상이 노심 반응도에 미치는 영향을 평가할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기계획사업 지원의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. I.S. Hong, C.H. Kim, B.J. Min, H.C. Suk, "Three Dimensional Two Group Finite Difference Diffusion Equation Solver for CANDU PHWR Analysis, FDM3D", 21st Annual Canadian Nuclear society Conference, Toronto, CANADA, 2000 June 11-14.
2. "CANDU6 Generating Station Physics Design Manual", Wolsong NPP 234, 86-03310-DM
3. I.S. Hong, C.H. Kim, B.J. Min, H.C. Suk and B.G. Kim, "Validation of WIMS-AECL With ENDF/B-F Against Phase B Reactor Physics Tests at Wolsong Units 2 and 3", Proceedings of the 6th International Conference on CANDU Fuel, Vol 1, pp.40-51, September 26-30, Niagara, CANADA, 1999.
4. J. Griffiths, "WIMS-AECL Users Manual", RC-1176 COG-94-52, AECL, 1994.
5. CNSC GAI position statement 1999.
6. G. Ilas, F. Rahnema, V. Khotylev, D. Serhiuta and R. J. Stamm'ler, "Impact of pressure tube aging on physics parameters of a CANDU lattice cell", ANFM2003.