

ESCORE 코드를 이용한 개량핵연료 시범집합체 핵연료 성능분석

김용덕, 최유선, 신호철, 배성만, 이상희, 이창섭
한전전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

장영기*, 김용환*, 김규태*
* 한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

Fuel Performance Analysis of the Korea Advanced Nuclear Fuel using ESCORE

Yong-Deog Kim, Yu-Seon Choi, Ho-Cheol Shin, Seong-Man Bae, Sang-Hee Lee, Chang-Sup Lee

Korea Electric Power Research Institute
Munji-dong 103-16, Yusung-gu
Taejeon, Korea

Young-Ki Jang*, Yong-Hwan Kim*, Kyu-Tae Kim*

* KEPCO Nuclear Fuel Company
Dukjin-dong 150, Yusung-gu
Taejeon, Korea

요 약

개량핵연료 시범집합체가 장전될 예정인 영광4호기 7주기는 16,248 MWD/MTU의 주기길이를 갖으며, 최대 핵연료봉 57,996 MWD/MTU인 노심으로 설계되었다.

EPRI가 개발한 ESCORE 핵연료 성능분석 코드를 사용하여 개량핵연료 시범집합체 및 최대연소도를 갖는 집합체에 대하여 건전성에 영향을 미치는 핵연료 온도, 봉내압 및 피복관 부식 등의 핵연료 성능분석을 수행하였다.

ABSTRACT

The Lead Use Assembly (LUA) of the Korea advanced nuclear fuel will be loaded in YGN4 cycle 7. The core cycle length is 16,248 MWD/MTU and 57,996 MWD/MTU is the maximum pin peak burnup. Fuel thermal and mechanical performance (i.e. maximum temperature, rod internal pressure, and cladding corrosion) evaluation is performed with ESCORE code which is developed by EPRI.

1. 서론

핵연료의 안전성과 핵연료주기비를 향상시키기 위한 원자로운영 조건은 날로 심해지고 있으며, 이러한 추세는 전 세계적으로 확산되어 핵연료의 고연소도 장주기운전을 요구하고 있는 실정이다. 이러한 요구에 맞추어 기존 핵연료의 개량 및 새로운 고성능 핵연료의 개발이 활발히 이루어져왔으며 현재 미국 등 선진 원자력국가에서는 개발된 핵연료를 상용장전하여 사용하고 있거나 시험원자로에서 성능을 시험하고 있는 상태이다. 그러나 그동안 우리나라에서는 핵연료개발 자립기술의 부족으로 인하여 해외 선진 기관에 핵연료의 개발을 의존해왔다. 이러한 이유로 기존 핵연료성능의 국제 경쟁력 약화로 인하여 해외시장개방시 해외 고성능 핵연료의 국내원전시장 잠식에 대처하지 못할 우려가 있다. 이를 위한 대처방안으로 현재 한전원자력연료(주)는 기존의 핵연료에 비해 연소성능 및 열적성능을 향상시켜 장주기 운전 및 원전의 출력향상 요구에 유연한 대처능력을 확보하기 위하여 한국표준형원전용 개량핵연료를 개발중에 있으며, 향후 개발된 개량핵연료 시범집합체 4다발은 영광4호기 7주기 노심에 장전될 계획이다. 개량형 핵연료를 상용로에 시범장전하기 위해서는 반드시 시범집합체의 기계적, 열적 및 성능적 안전성 검증이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 시범집합체가 장전될 노심모형에 대한 안전성 검증과 성능분석을 위해 EPRI가 개발한 ESCORE 코드를 사용하여 시범집합체와 최대연소도를 가지는 집합체에 대한 핵연료성능분석을 수행하였다.

2. 노심장전모형 검토

시범집합체가 장전될 영광 4호기 7주기는 주기길이 16,248 MWD/MTU를 갖는 노심으로 설계되었고, 4개의 시범집합체가 장전될 것이다. 시범집합체(KA)는 4.5%와 4.0%의 연료가 zoning되어 있는데, 그림 1과 표 1에서 보는 바와 같이 8%가 돌리니아 독봉이 집합체내에 8개 장전된 형태로 기하학적으로는 K1의 형태이지만, 독봉의 농축도를 2% 높여 시범집합체에서 노심의 첨두출력이 발생하지 않도록 한 것이다. 첨두 출력이 발생하는 집합체는 그림 2에서 보는 바와 같이 20번째의 H1으로 나타났다. 성능분석을 위한 속중성자속, fluence, 축방향출력분포 등을 매 1000 MWD/MTU단위로 연계자료를 준비하였고, 연료봉의 성능분석에 가장 큰 영향을 미치는 연장운전(500MWD/MTU)을 고려한 최대 핵연료봉 연소도는 57,994 MWD/MTU로 인허가 제한치를 만족하도록 설계하였다. 이는 연소도 불확실도 값인 750 MWD/MTU가 포함된 값이다.

3. ESCORE 핵연료 성능분석

핵연료의 정상상태 및 사고해석 거동에 사용되는 ESCORE 코드를 사용하여 핵연료 중심온도, 핵분열 기체방출, 핵연료봉내압 및 피복관 부식을 각각 분석하였다. 계산에 사용된 운전조건은 표2에 나타내었다.

3-1. 핵연료 연소도

그림 3은 개량핵연료 시범집합체(Lead Use Assembly)와 최대연소도를 갖는 H1 집합체의 시간에 따른 연소도를 비교한 그래프이다. 시간이 0에서 443일까지 변화함에 따라 LUA의 연소도는 0 ~ 22,000 MWD/MTU 까지 연소되었고 H1 집합체의 연소도는 40,000 ~ 58,000 MWD/MTU 까지 연소되었다. 상대적으로 높은 반경방향 첨두출력값(Radial Peaking Factor)을 갖는 LUA의 연소도 기울기가 높은 경향을 보였다.

3-2. 핵연료 중심온도 (집합체내 최대 연소도 봉)

시간에 따른 핵연료 소결체 중심온도 변화를 계산한 그래프를 그림 4에 나타내었다. LUA의 핵연료 중심온도는 초기 소결체의 고밀화에 의한 열전도 저하로 인해 1,052 °C 까지 증가하다가 소결체 팽윤(gap의 감소)에 의한 열전도도 향상으로 인해 929 °C 까지 감소한 후 핵분열기체 방출 등의 이유로 인하여 gap내 열전도도가 감소하여 다시 중심온도가 증가하는 현상을 보였다. 3주기 연소도를 갖는 H1 집합체의 경우 시간에 따라 핵연료의 중심온도는 790에서 830 °C 까지 선형적으로 증가하였다. 이는 소결체의 고밀화는 이전 주기에서 이미 완료되었으므로 핵분열 방출 및 소결체 자체의 열전도도 감소가 핵연료 중심온도를 선형적으로 증가시킨 주요한 요인으로 작용한 것으로 생각된다.

3-3. 핵분열 기체방출

그림 5와 6은 LUA 및 H1 집합체의 핵연료 소결체내 핵분열방출기체 분포를 나타낸 분포도를 계산한 그림이다. 주기말의 핵연료봉의 평균 연소도는 LUA와 H1에서 각각 22,420과 58,110 MWD/MTU 이었다. LUA의 경우 핵분열 방출이 핵연료 소결체 중심에 많이 밀집한 반면, H1에서는 핵분열 방출이 주로 소결체 외곽에서 많이 일어나고 있음을 볼 수 있는데 이는 핵연료 연소에 따라 핵분열기체가 중심에서 소결체 외곽으로 입계(grain boundary)와 기공(porosity)을 따라 확산되어 일어나는 현상으로 고연소도로 갈수록 핵분열 방출이 주로 소결체 외곽부분에서 개기공(open porosity)을 따라 발생하는 것으로 알려져 있다.

3-4. 핵연료봉내압

LUA와 H1 집합체 시간에 따른 핵연료봉내압의 변화를 계산한 그래프를 그림 7에 나타내었다. LUA의 경우 핵연료봉내압은 초기에 6.41 MPa 까지 감소하다가 2,700 MWD/MTU의 연소도에서 다시 증가하였고 H1의 경우는 초기 봉내압 6.81 MPa에서 일정한 값으로 유지되는 경향을 보였다. 이러한 현상은 LUA의 경우는 소결체의 고밀화 및 팽윤현상이 일어나는 반면 H1의 경우는 거의 발생하지 않기 때문이다. 핵분열방출기체는 거의 영향을 주지 않은 것으로 판단되는데 이는 두

집합체의 경우 주기말까지 모두 연료봉내 약 0.2 % 정도의 핵분열기체 방출율을 나타내었기 때문이다.

3-5. 피복관 부식

그림 8은 LUA와 H1 집합체내 핵연료피복관 산화물 두께를 계산한 그래프이다. LUA의 경우 시간에 따라 약 $0.0329 \mu\text{m}/\text{days}$ 의 기울기를 가지면서 $16.1 \mu\text{m}$ 까지 증가하였으며 H1의 경우는 약 $0.1273 \mu\text{m}/\text{days}$ 의 기울기를 가지면서 $103.1 \mu\text{m}$ 까지 산화물의 두께가 증가하였다. H1의 경우가 산화기울기의 값이 큰 이유는 T.Kido 등에 의하면 기초사된 피복관의 부식속도가 조사전 피복관보다 빠른 것으로 보고되고 있는데 이는 피복관 재료가 조사에 의해 재료적으로 변형되어 산화저항성이 감소되기 때문이라고 알려져 있다. 또한 그림 9에서 볼 수 있듯이 ESCORE 모델에서는 피복관 / 산화막 계면 온도를 633K로 가정할 때 348일에 부식가속 천이점(transient point)에 도달하므로 기초사된 H1 집합체의 경우는 천이점에 이미 도달된 상태이기 때문에 부식속도가 LUA에 비해 큰 것으로 판단된다.

3. 결론

1. 개량핵연료 시범집합체가 장전될 예정인 영광4호기 7주기는 16,248 MWD/MTU의 주기길이를 갖으며, 최대 핵연료봉 57,996 MWD/MTU인 노심으로 설계되었다.
2. 상대적으로 높은 반경방향 첨두출력값(Radial Peaking Factor)을 갖는 LUA의 연소도 기울기가 높은 경향을 보였다.
3. LUA의 핵연료 중심온도는 초기 소결체의 고밀화에 의한 열전도 저하로 인해 $1,052 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 증가하다가 소결체 팽윤(gap의 감소)에 의한 열전도도 향상으로 인해 $929 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 감소한 후 핵분열기체 방출 등의 이유로 인하여 gap내 열전도도가 감소하여 다시 중심온도가 증가하는 현상을 보였다.
4. 3주기 연소도를 갖는 H1 집합체의 경우 시간에 따라 핵연료의 중심온도는 790에서 $830 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 선형적으로 증가하였다. 이는 소결체의 고밀화는 이전 주기에서 이미 완료되었으므로 핵분열 방출 및 소결체 자체의 열전도도 감소가 핵연료 중심온도를 선형적으로 증가시킨 주요한 요인으로 작용한 것으로 생각된다.
5. LUA의 경우 핵분열 방출이 핵연료 소결체 중심에 많이 밀집한 반면, H1에서는 핵분열 방출이 주로 소결체 외곽에서 많이 일어났다.
6. 핵분열방출기체는 핵연료봉내압에 거의 영향을 주지 않은 것으로 판단되는데 이는 두 집합체의 경우 주기말까지 모두 연료봉내 약 0.2 % 정도의 핵분열기체

방출율을 나타내었기 때문이다.

7. H1의 경우가 산화기울기의 값이 큰 이유는 기초사된 피복관의 부식속도가 조사 전 피복관보다 크기 때문이며, 기초사된 H1 집합체의 경우는 ESCORE 부식모델의 천이점에 이미 도달된 상태이기 때문에 부식속도가 LUA에 비해 큰 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

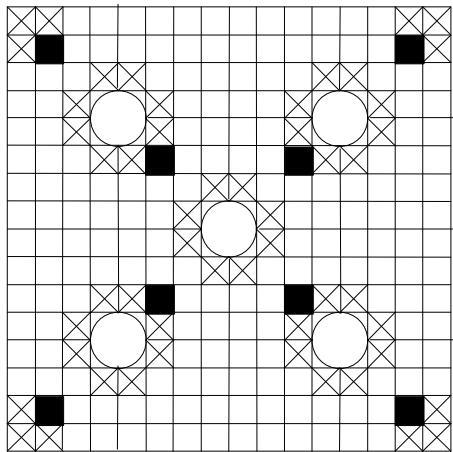
1. T.Kido, A Study of Enhanced Uniform Corrosion of Zircaloy-4 Cladding During High Burnup Operation in PWRs , *Sixth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems Water Reactors*, Edited by R.E. Gold and E.P. Simonen, 1993.1.
2. The Nuclear Design Report for Young Gwang Nuclear Power Plant Unit 4 Cycle 5, KNF-Y4C5-00005, March 2000
3. A.M.Garde, et al., Waterside Corrosion of Zircaoy Fuel Rods, EPRI NP-2789, Research Project 1250-1, Combustion Engineering, Inc., December 1982.
4. R.B.Fancher, I.B.Fiero, H.R.Freeburn, A.M.Garde, M.W.Kennard, M.A.Krammen, P.G.Smerd and N.T.Yackle, ESCORE the EPRI Steady-State CoreReload Evaluator Code: General Description, EPRI Report, NP-5100, February 1987.
5. H.E.Evans, M.V. Polley, A Review of the NFIR-I Zircaloy Corrosion Projects, Volume 3: Code Predictions of In-Reactor Corrosion, EPRI NP-7320-D, Volume 3, Nuclear Electric PLC, September 1992.
6. Ph.Billot, A.Giordano, Comparison of Zircaloy Corrosion Models from the Evaluation of In-Reactor and Out-of-Pile Loop Performance, Zirconium in the Industry: Ninth International Symposium, ASTM STP 1132, pp.539-565, 1991.
7. K.D.Sheppard, et al., Analysis of Zircaloy Oxide Thickness Data from PWRs, EPRI NP-6698, Research Project 1250-18, S.M.Stoller Corporation, February 1990.
8. R.H.S.Winterton, Thermal Design of Nuclear Reactors, Chapter 5, University of Birmingham, England, 1981.
9. S. Levy Incorporated, EPRI PWR Fuel Cladding Corrosion(PFCC) Model, TR-105387-V1, December 1995.





표 1. 신연료 집합체 사양

Type	Number of Assembly	Number of Rods (Hi/Lo/Gd)	U-235 Enrichment (Hi/Lo/Gd) wt%	Gd203 w/o In Gd Rod
K0	8	184/52/00	4.50/4.00	-
K1	16	176/52/08	4.50/4.00/0.711	6
K6	36	172/52/12	4.50/4.00/0.711	8
KA (LUA)	4	176/52/08	4.50/4.00/0.711	8

표 2. 운전조건

구분	값
Core Average Power	176.87 W/cm
Core Average Fast Flux (n/cm ² /sec)	2.8773E+14 - 2.9778E+14
Coolant Pressure	15.513 MPA
Coolant Inlet Temperature	295.6 ℃



-  **Guide Tube**
-  **Normal Fuel Pin**
-  **Low Enriched Fuel Pin**
-  **Gadolinia Bearing Fuel Pin**

- **U-235 Enrichment**
 Normal Fuel Rod : 4.50 w/o
 Low Enriched Fuel Rod : 4.00 w/o
 Fuel Rod Bearing Gd2O3 : 0.711 w/o
- **Gd2O3 Content** : 8 w/o
- **Axial Cutback Length** : 7.5 inches

그림 1. LUA Configuration

N	P	N : Box Number P: Previous Box number		1	12	2	18	3	36
	XX	XX : Assembly ID		H0		H2		H2	
		RR : Number of rotations				2		0	
			4	10	5	6	7	5	8
			J8		K0	K1	J0		KA
				2				0	
		9	8	10	11	7	12	19	13
		H2		K1	J1	J6		K6	J6
			0			0	0		
		15	16	16	17	27	19	11	21
		J8		K1	K6	J6	K6	H1	J6
			2			0		0	
		22	23	38	24	41	25	42	26
		K0	J1	J6	H0	G0	K6	H0	
			0		0	0	0		1
29	31	30	31	32	32	33	37	34	35
H0		K1	J6	K6	G0	K6	J5	K6	
	2			0		0		2	
37	24	38	22	39	40	23	41	42	30
H2		J0	K6	H1	K6	J5	J6	H2	
	0		0		0		2	2	2
45	50	46	47	47	48	34	49	35	50
H2		KA	J6	J6	H0	K6	H2	H2	
	0			2		3		0	
								2	
									21
									0

그림 2. LUA를 포함한 영광 4호기 7 주기 핵연료 장전 모형

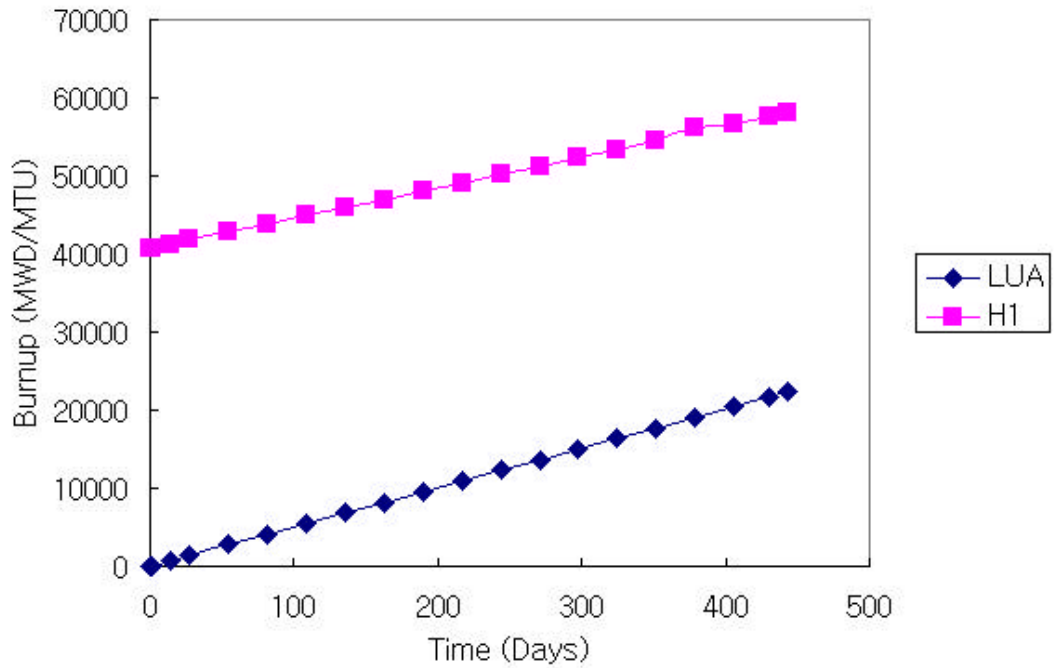


그림 3. LUA와 H1 집합체의 시간에 따른 연소도 비교

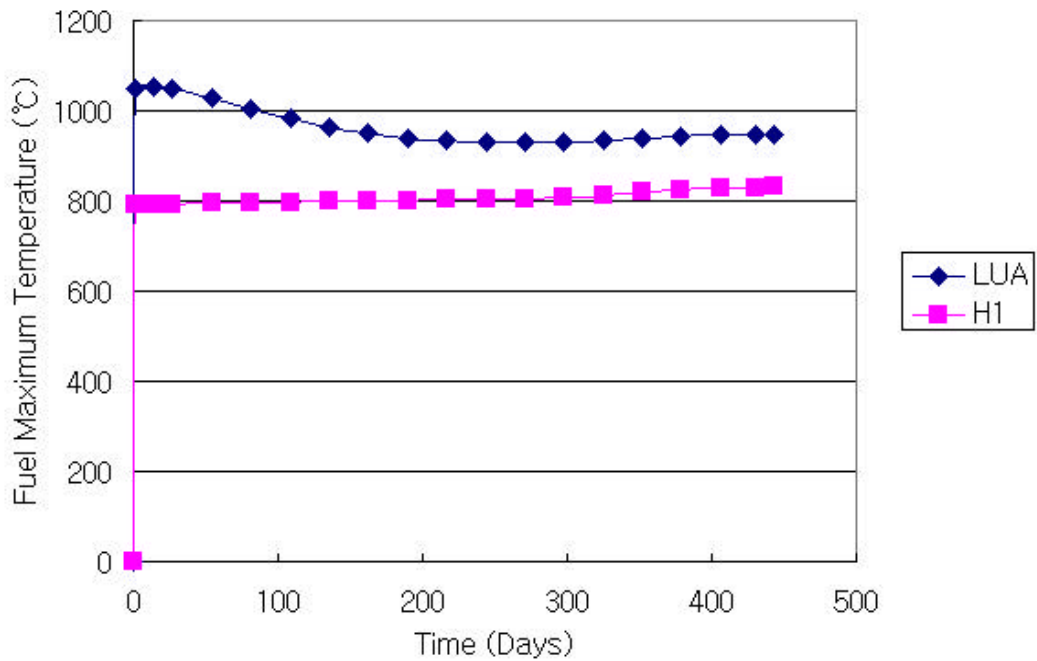


그림 4. LUA와 H1 집합체의 시간에 따른 핵연료 중심온도 비교

Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting
Cheju, Korea, May 2001

YGN 4/ LEAD USE ASSEMBLY /CYCLE 7

ESCORE VERS:

DETAILED FISSION GAS RELEASE

NODAL FISSION GAS RETAINED WITHIN GRAINS(MOLES/CM3 X100000) IN FUEL RING NUMBER:
NODE BURNUP 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- GWD/MTU

TIME= 444.33 DAYS ROD AVG BU= 22.42 GWD/MTU

1	9.96	12	12	12	12	12	12	12	12	12
2	15.04	16	16	16	16	17	17	17	17	17
3	18.36	22	22	22	21	21	21	20	19	19
4	20.88	25	25	24	24	23	22	21	21	20
5	23.03	28	27	27	26	26	24	23	22	21
6	24.30	29	29	28	28	27	25	24	22	21
7	24.74	30	29	29	28	27	26	24	23	22
8	24.92	30	30	29	28	27	26	24	23	22
9	25.01	30	30	29	28	27	26	24	23	22
10	25.07	30	30	29	28	27	26	24	23	22
11	25.12	30	30	29	28	27	26	24	23	22
12	25.20	30	30	29	28	27	26	24	23	21
13	25.29	30	30	29	29	27	26	24	22	21
14	25.38	30	30	30	29	27	25	24	22	21
15	25.49	30	30	30	29	27	25	23	22	21
16	25.61	31	30	30	29	27	25	23	21	20
17	25.74	31	30	30	29	27	25	23	21	20
18	25.81	31	31	30	29	27	25	22	21	19
19	25.69	31	30	30	28	27	24	22	20	19
20	24.85	30	29	29	28	26	24	22	20	19
21	23.07	28	27	27	26	25	23	22	21	20
22	20.68	25	25	24	24	23	22	21	21	20
23	17.25	21	21	20	20	20	19	19	19	19
24	11.63	14	14	14	14	14	14	14	14	14

그림 5. LUA 집합체의 핵연료 소결체내 핵분열방출기체 분포

YGN 4/ PEAK ROD ASSEMBLY H1 No.20 /CYCLE 7

ESCORE VERS:

DETAILED FISSION GAS RELEASE

NODAL FISSION GAS RETAINED ON GRAIN BOUNDARIES(MOLES/CM3 X100000) IN FUEL RING NUMBER:
NODE BURNUP 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

- GWD/MTU

TIME= 1442.71 DAYS ROD AVG BU= 58.11 GWD/MTU

1	31.13	0	0	0	1	1	1	1	1	2
2	44.90	0	1	1	2	3	4	5	6	7
3	53.45	0	1	2	4	6	8	11	13	15
4	58.83	0	1	3	6	9	12	16	19	23
5	62.35	1	2	4	7	12	17	22	26	30
6	66.36	1	2	5	9	15	21	27	32	37
7	67.77	1	2	5	10	17	23	30	35	40
8	68.58	1	3	6	11	18	25	32	37	42
9	68.99	1	3	6	12	19	26	33	38	44
10	69.05	1	3	7	12	20	27	34	39	44
11	68.83	1	3	7	13	20	28	34	40	45
12	68.32	1	3	7	13	20	28	35	40	45
13	67.50	1	3	7	13	20	27	34	39	44
14	66.45	1	3	7	13	19	26	33	38	43
15	65.21	1	3	7	12	19	25	32	36	41
16	63.67	1	3	6	12	18	24	30	35	39
17	61.61	1	3	6	11	16	22	28	33	37
18	59.83	1	3	6	10	15	21	26	30	34
19	57.68	1	3	5	9	14	19	24	28	31
20	54.71	1	2	5	8	12	17	21	24	28
21	51.19	1	2	4	6	10	13	17	20	23
22	47.26	1	1	3	5	7	10	12	14	17
23	40.67	0	1	2	2	4	5	6	7	8
24	29.13	0	0	0	1	1	1	1	2	2

그림 6. 최대연소도 집합체(H1)의 핵연료 소결체내 핵분열방출기체 분포

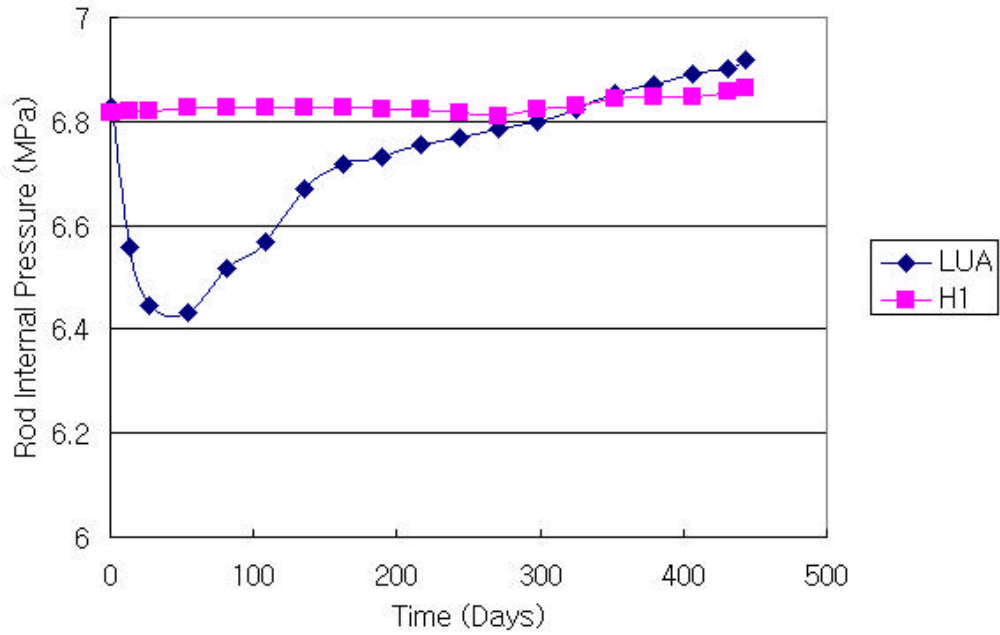


그림 7. LUA와 H1 집합체의 시간에 따른 봉내압 변화

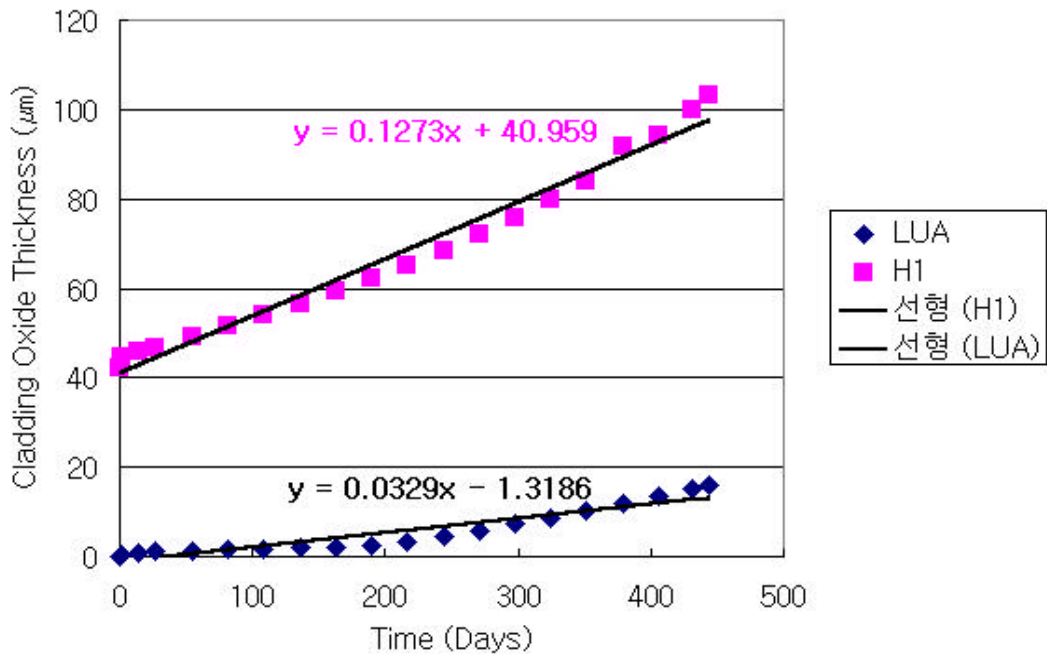


그림 8. LUA와 H1 집합체의 시간에 따른 피복관 산화물 두께 변화

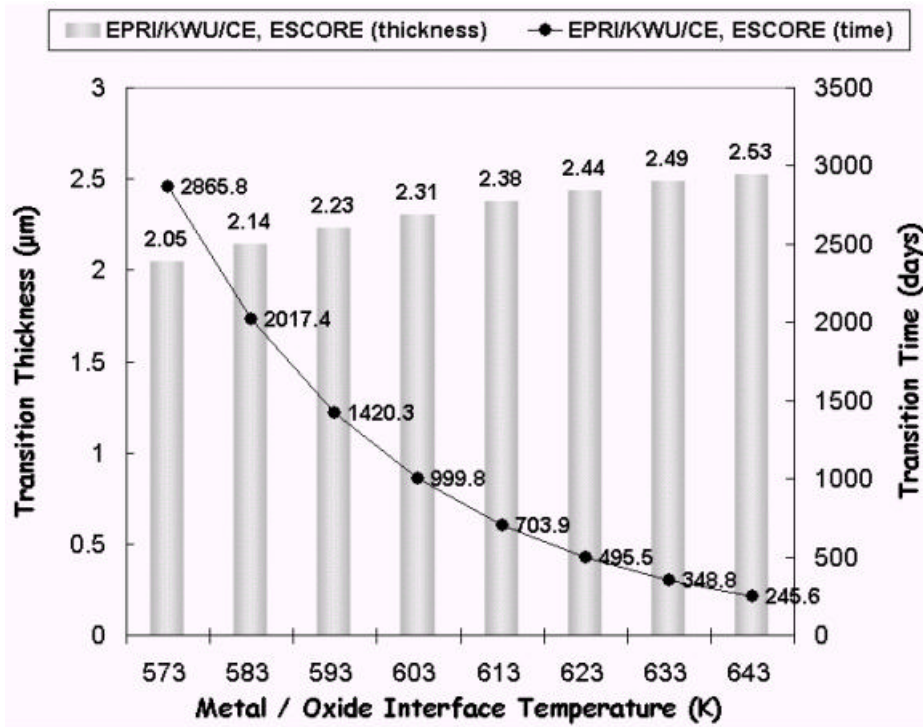


그림 9. ESCORE 피복관 부식모델의 온도에 따른 천이점