

다공원통형 구조물의 온도 및 열응력해석

Parameter Analysis on the Temperature and Thermal Stress of the Cylindrical Structure with Multiple Holes

강영환

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

이영신, 최영진

충남대학교

대전광역시 유성구 궁동 220

요약

다공원통형 구조물인 핵연료 캡슐은 하나로서 조사시험이 진행되는 동안 핵분열 및 감마속 분 위기에 놓이므로 모든 부품이 열원으로 작용하게 된다. 그러므로 캡슐 설계시에 열특성을 정확히 예측하는 일은 아주 중요하다. 일련의 설계변수 연구로 다공원통형 구조물에 삽입되는 시편의 위치, 열매체 지지관 두께, Gap의 크기가 온도, 부품의 변위 및 열응력에 미치는 영향이 평가되었다. 열특성해석은 상용유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 수행되었으며, 해석결과 열매체 지지관의 변위가 건전성 확보에 가장 중요함이 확인되었다. 또한 지지관의 열응력 및 변위값은 ASME 코드의 허용한계내에 있어 그 건전성이 입증되었다.

Abstract

During fuel irradiation tests in the in-core of HANARO, all components of the capsule with multiple holes act as heat sources due to high gamma and fission heat. In the design stage, a series of design parameter study were performed to confirm the thermal integrity of the capsule with multiple holes. The main parameter reviewed in this study are as follows: the position of the specimen, the thickness of the support tube and gap size. From the analysis performed by using of the FEM code ANSYS, it is confirmed that gap size effect on the capsule is one of the most important parameter of the capsule integrity. And the final thermal stress and displacement of the support tube with a increase of gap size are also under the allowable limits of ASME code.

1. 서론

다공원통형 구조물이 하나로내에서 핵연료 조사시험캡슐로 사용될 때 외통관, 지지관, 피복관, 소결체는 γ -flux에 의하여 열원으로 작용한다. γ -flux에 의해 발생된 열원은 다공원통형 구조물의 각 부분의 기하학적 특성에 따라 다른 온도분포와 온도에 의한 기계적인 특성을 나타내고 있다 [1~4]. 따라서 다공원통형 구조물의 경계조건의 효과를 평가하고 기하학적특성 연구할 필요가 있다. 특히 다공원통형 구조물에서는 간격이 좁은 갭이 존재하여 각 부품이 고온으로 올라가면 열변형에 의하여 간섭이 될 가능성이 있다. 또한 다공원통형 구조물은 하나로내에 장착되고 운전되므로 열적 및 구조적 건전성을 확보해야 한다[2~4].

본 연구는 다공원통형 구조물 구성하고 있는 소결체의 위치, 갭의 크기, 지지관의 두께를 매개변수로 하여 열응력, 온도분포, 변형률을 상용유한요소 프로그램인 ANSYS를 통하여 열특성을 연구하였다.

2. 본론

2.1 해석모델

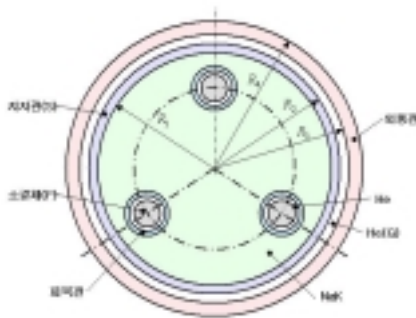


Fig. 1 Schematic of the capsule

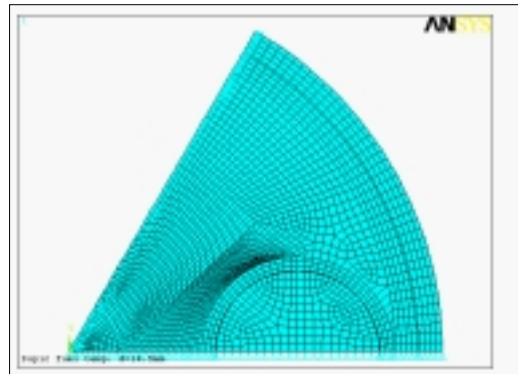


Fig. 2 Finite element model of the capsule

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 다공원통형 구조물의 개념을 보여주고 있다. 다공원통형 구조물의 반경은 56mm이며, 외통관, 지지관, 피복관의 재질은 SUS304, 열매체는 NaK, 피복관이며, 갭에는 He으로 채워져 있고, 냉각수의 온도는 40°C이다. Fig. 1에서 F, S, G는 매개변수로 각각의 위치나 크기에 따라 해석을 수행하였다.

Fig. 2은 유한요소해석의 경계조건을 나타내고 있다. 축대칭을 고려하여 1/6 모델링을 하였으면 외통관 외면은 강제대류 조건을 주었다. 해석에 사용한 프로그램은 ANSYS 5.6을 사용하였고, 사용요소는 2-D Coupled-Field Solid 요소인 PLANE13을 사용하였다[5].

해석에 주어진 이때 대류계수 h 는 이며, 냉각수 온도는 40°C이다. 소결체의 열발생밀도는 462.60 MW/m^3 , 지지관은 SUS304이며 이때 열발생밀도는 1.22 MW/m^3 NaK의 열발생밀도는 13.26 MW/m^3 이다. 갭에서는 복사에 비해 전도가 지배적이므로 전 $17 \text{ kW/m}^2\text{°C}$ 도만 고려하여 해석하였다.

2.2 해석결과 및 고찰

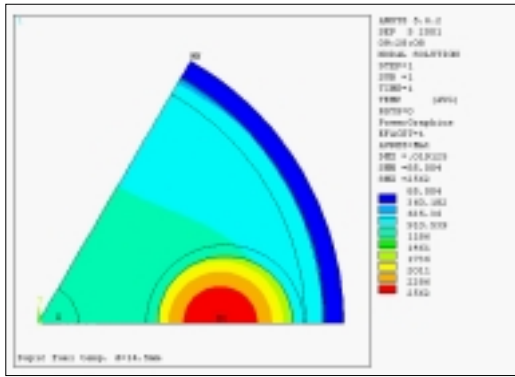


Fig. 3 Temperature distribution of the capsule

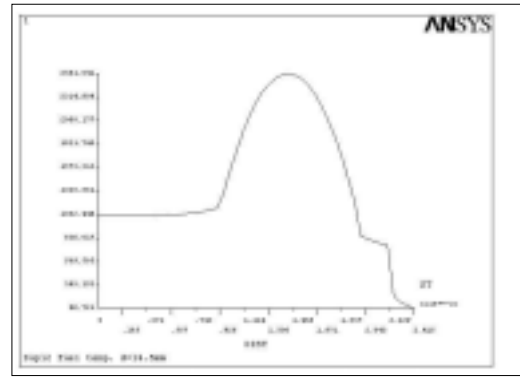


Fig. 4 Radial temperature profile of capsule

Fig. 3은 다공원통형 구조물의 온도분포를 보여주고 있다. 여기서 해석된 모델의 소결체 반경은 5.275mm이고, 갭은 모두 0.1mm이다. 또한 외통관의 두께는 1.5mm, 지지관의 두께는 1.4mm, 피복관의 두께는 0.89mm 이다.

최고온도는 소결체 중심이 아닌 소결체 중심에서 다공원통형 구조물의 중심으로 편심된 곳에서 발생하였으며 외통관 최저온도는 85℃이다. 피복관 최고온도는 1158℃이고 최저온도는 805.9℃이다. 지지관의 최고온도는 다공원통형 구조물의 802.3℃이고 최저온도는 발생하며 662.9℃이다. 이와 같이 모든 온도분부는 소결체와 멀리 떨어진 축대칭면과 냉각수와 가까운 곳에서 최저온도가 발생되며 소결체와 가장 가깝고 냉각수와 비교적 먼 곳에서 최고온도가 발생하였다. Fig. 4는 다공원통형 구조물의 반경방향의 온도분포를 보여주고 있다. 열매체에서는 온도변화가 크지 않지만 냉각수에 가까워질수록 온도는 급격히 감소하였다. 특히 갭에 채워진 헬륨의 영향으로 온도는 급격하게 떨어지고 지지관과 외통관은 상대적으로 완만한 감소를 보이고 있다. 이는 소결체와 헬륨에 비해 열전도도가 크기 때문이다.

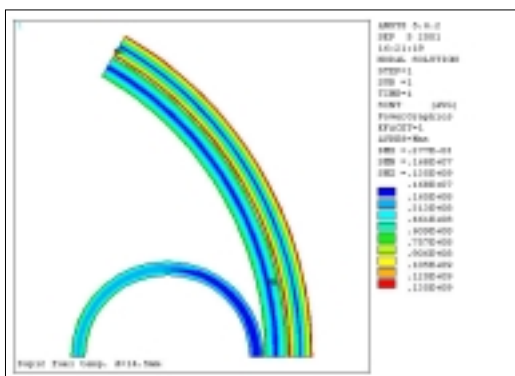


Fig. 5 Thermal stress of tubes

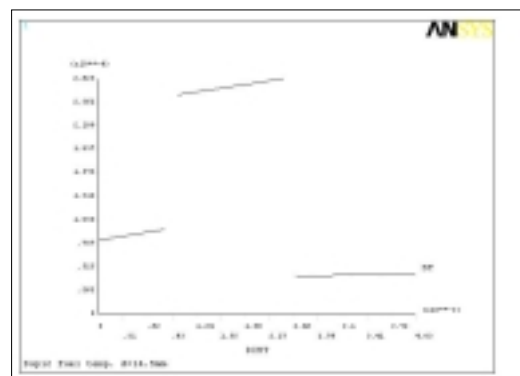


Fig. 6 Radial displacement profile of the tubes

Fig. 5는 피복관, 지지관, 외통관의 열응력을 나타내고 있다. Fig. 5에 보여주는 것과 같이 온도차가 가장 큰 외통관 부분에서 가장 큰 열응력 135MPa이 발생하고 지지관에서는 75MPa, 피복관에서는 78MPa이 발생한다. 응력분포는 온도차의 영향으로 인해 지지관과 외통관은 일정한 분포를

보이데 반해 피복관은 캡슐에 대해 편심되고 냉각수의 영향을 받아 다공원통형 구조물 중심에 가까운 곳에서 최대열응력이 발생하였다. SUS316의 허용응력은 ASME Code Sec III Division 1 Subsection NB 3220의 응력평가 기준인 $P_m < S_m$ 과 $P_m + P_e < 3S_m$ 에 의해서 $3S_m$ 인 468MPa이므로 건전성을 확보할 수 있다[6~8].

Fig 6은 피복관, 지지관, 외통관의 변위를 순차적으로 보여주고 있다. 지지관의 변위가 가장 크게 나타났는데 이는 피복관 반경보다 지지관의 반경이 크기 때문에 변위가 크고 지지관의 변위가 외통관의 변위보다 큰 이유는 지지관의 온도가 외통관의 온도에 비해 높기 때문이다. 즉 비슷한 온도에서는 반경이 큰 관이 변위가 크고 비슷한 반경에 대해서는 온도 높은 관이 변위가 크다.

Table 1 Variation of temperature at capsule by Fuel Pin location

Fuel Pin location (mm)	Fuel Pin		Cladding		Support tube		Out tube	
	Center Temp.(°C)	Outer Temp.(°C)	Inner Temp.(°C)	Outer Temp.(°C)	Inner Temp.(°C)	Outer Temp.(°C)	Inner Temp.(°C)	Outer Temp.(°C)
F1	2475.00	903.98	741.12	694.99	629.77	567.56	181.65	94.50
F2	2469.00	897.63	734.29	688.19	634.64	571.73	182.92	95.01
F3	2459.00	890.72	727.62	681.73	639.82	576.10	184.27	95.55
F4	2440.00	884.12	721.11	675.33	645.41	580.96	185.76	96.16
F5	2431.00	880.37	715.77	669.74	651.78	586.46	187.43	96.83
F6	2424.00	873.46	709.61	663.80	658.06	591.93	189.11	97.51

Table 1은 캡슐의 중심에서 소결체 중심까지 거리가 13.3mm에서 14.8mm까지 0.3mm씩 증가시켰을 때 소결체의 위치에 따른 각 부분별 온도 결과를 나타내고 있다. F1은 다공원통형 구조물에서 13.3mm 떨어진 곳에서 소결체가 위치할 경우이면 F2는 F1보다 소결체가 다공원통형 구조물의 반경방향으로 0.3mm 증가하여 위치할 경우이며, F6은 다공원통형 구조물 중심에서 14.8mm 떨어진 경우이다. 소결체의 위치가 다공원통형 구조물의 중심에서 멀어지면 냉각수의 영향이 상대적으로 커지기 때문에 소결체 및 피복관의 온도는 감소한다. 그러나 소결체가 지지관과 가까워짐에 따라 지지관 및 외통관의 온도가 증가한다. 소결체가 냉각수와 가까워짐에 따른 소결체, 지지관, 피복관, 외통관의 영향은 크지 않다.

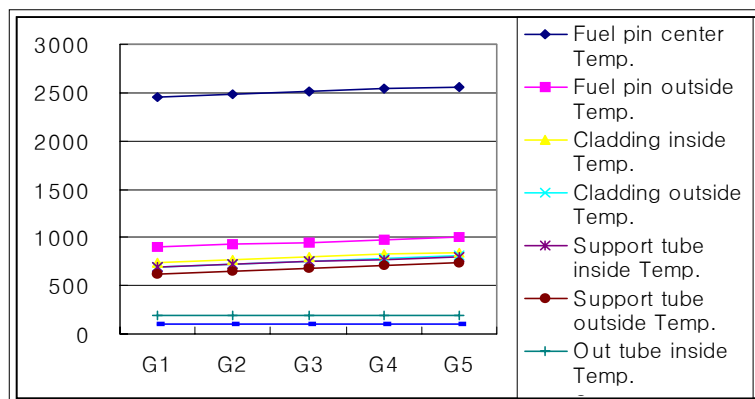


Fig. 7 Variation of temperature at capsule by increasing of gap size

Fig. 7는 갭의 크기를 0.11mm에서 0.15mm까지 0.01mm씩 증가했을 때 각부분별 온도결

과를 나타내고 있다. G1은 갭의 크기가 0.11mm인 경우이고, G2는 G1보다 갭의 크기가 0.01mm 증가한 경우이다. G6은 갭의 크기가 0.15mm인 경우이다. 갭의 크기가 증가하면 갭의 기점으로 외통관의 온도는 감소하고 소결체 및 지지관의 온도는 증가한다. 특히 지지관의 온도상승이 크다. 이는 갭에 채워진 He의 열전도도가 낮기 때문에 열전달이 상대적으로 잘 되지 않기 때문이다. 즉 열도도가 잘되는 지지관의 면적이 작아지고 He의 면적이 커졌기 때문이다.

Table 2 Variation of temperature at capsule by increasing thickness of the support tube

Thickness of support tube (mm)	Fuel Pin		Cladding		Support tube		Out tube	
	Center	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer
	Temp.(°C)	Temp.(°C)	Temp.(°C)	Temp.(°C)	Temp.(°C)	Temp.(°C)	Temp.(°C)	Temp.(°C)
S1	2417.00	871.30	706.08	659.94	642.08	590.42	188.62	97.31
S2	2419.00	871.27	707.16	661.24	647.38	590.94	188.80	97.38
S3	2423.00	872.53	708.41	662.53	652.71	591.44	188.96	97.45
S4	2424.00	873.46	709.61	663.80	658.06	591.93	189.11	97.51
S5	2425.00	874.73	710.93	665.11	663.48	592.47	189.29	97.59

Table 2은 지지관의 두께 1.1mm에서 1.5mm까지 0.1mm씩 증가시켰을 때 각부분별 온도결과를 나타내고 있다. S1은 지지관의 두께가 1.1mm인 경우이며 S2는 S1보다 지지관의 두께가 0.1mm 증가한 경우이다. S5는 지지관의 두께가 1.5mm인 경우이다. 지지관의 두께를 증가시키면 캡슐의 온도는 전체적으로 증가한다. 이는 NaK와 비교하여 SUS304의 열전도도가 작기 때문에 지지관 내부에 위치한 소결체나 피복관의 온도를 증가시키고 외통관의 온도는 증가하지만 그에 영향은 크지 않다.

Table 3 Thermal stress of various geometry of the capsule

	Thermal stress of various position of Fuel Pin(MPa)			Thermal stress of various gap size(MPa)			Thermal stress of various thickness of support tube (MPa)	
	Support tube	Cladding		Support tube	Cladding		Support tube	Cladding
	F1	87.8		136.0	G1		83.6	135.0
F2	87.4	135.0	G2	81.4	135.0	S2	73.8	134.0
F3	87.1	135.0	G3	79.4	135.0	S3	80.0	135.0
F4	86.8	135.0	G4	77.4	135.0	S4	86.2	135.0
F5	86.5	135.0	G5	75.5	135.0	S5	92.3	135.0
F6	86.2	135.0		-	-		-	-

Table 3는 소결체 위치, 갭의 크기, 지지관의 두께의 변화에 따른 지지관과 피복관의 열응력을 나타내고 있다. 소결체의 위치 및 갭의 크기변화에 따라 외통관 열응력의 변화는 크지 않다. 시편의 위치 및 갭의 크기변화에 따라 온도가 변화차이가 작을 뿐만 아니라 지지관 및 외통관 내면과 외면에서 상대적으로 비슷한 온도만큼 증가하거나 감소하기 때문이다. 지지관의 열응력의 경우 소결체의 위치변화에는 영향이 적지만 갭의 크기변화와 지지관의 두께변화에 따라 영향을 받으며 특히

지지관의 두께변화에는 상당한 영향을 받는다. 이는 갭의 크기변화는 지지관에 간접적인 온도차를 가져오지만 지지관의 두께변화는 두께가 증가하면 증가할수록 온도차가 커지기 때문에 직접적으로 영향을 받는다.

Table 4 Variation of displacement at support tube and out tube by Fuel Pin location

	Support tube		Out tube	
	Displacement of the inside radius(mm)	Displacement of the outside radius(mm)	Displacement of the inside radius(mm)	Displacement of the outside radius(mm)
F1	0.1969	0.2112	0.0446	0.0481
F2	0.1962	0.2106	0.0440	0.0475
F3	0.1954	0.2099	0.0433	0.0469
F4	0.1945	0.2092	0.0426	0.0462
F5	0.1936	0.2085	0.0418	0.0454
F6	0.1927	0.2077	0.0410	0.0447

Table 4는 시편의 위치변화에 따른 지지관 및 외통관 내면과 외면의 변위를 나타낸다. 변위는 온도에 영향을 받기 때문에 고온이 될수록 변위량은 크다. 또한 피복관, 지지관, 외통관의 반경이 커질수록 변위는 증가한다. 지지관의 변위가 외통관의 변위보다 상대적으로 큰 이유는 반경의 영향보다 온도의 영향을 받기 때문이다. 지지관 외면온도는 560°C이지만 외통관의 외면온도는 100°C 이하이다. Table 4에서 나타낸 것과 같이 지지관 외반경변위가 외통관 내반경변위보다 크기 때문에 상대적으로 갭이 줄어든다. 갭의 크기가 줄어들면 전도가 원활하게 되고 외통관을 제외한 캡슐의 전체적인 온도가 줄어든다. 시편의 위치변화에 따른 지지관 및 외통관의 온도변화는 30°C 정도이므로 각 부분별 변위의 변화는 적다.

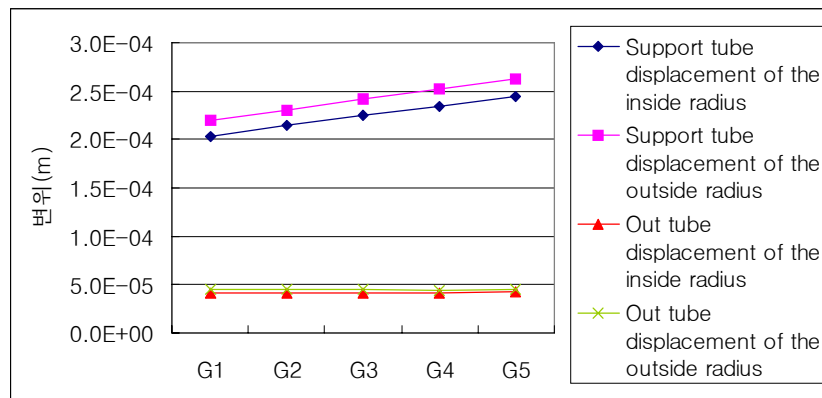


Fig. 8 Variation of displacement at support tube and out tube by increasing of gap size

Fig. 8는 갭의 크기변화에 따른 지지관 및 외통관 내면과 외면의 변위를 나타낸다. 갭의 크기변화에 따라 직접적으로 영향을 받는 지지관에서 변위의 변화가 크게 나타났다. 이는 Fig. 7에서 나타낸 것과 같이 He의 영향으로 인해 지지관의 온도변화가 크기 때문이며, He의 영향으로 인해 외통관은 지지관에 비해 변위의 변화가 적고 냉각수의 영향으로 인해 변위가 적다.

Table 5 Variation of displacement at support tube and out tube by increasing thickness of the support tube

	Support tube		Out tube	
	Displacement of the inside radius(mm)	Displacement of the outside radius(mm)	Displacement of the inside radius(mm)	Displacement of the outside radius(mm)
S1	0.1932	0.2048	0.0409	0.0446
S2	0.1931	0.2058	0.0409	0.0446
S3	0.1929	0.2067	0.0410	0.0446
S4	0.1927	0.2077	0.0410	0.0445
S5	0.1925	0.2086	0.0410	0.0447

Table 5은 지지관의 두께변화에 따른 변형률의 변화를 나타내고 있다. 지지관의 두께변화에 따른 온도변화가 상대적으로 다른 변화와 비교하여 가장 작으므로 변형률의 변화 또한 작다. 특히 외통관의 변형률은 무시할 수 있다.

3. 결론

고온에서 사용되는 핵연료 캡슐과 같은 다공원통형 구조물에서는 각 부품의 열특성을 파악하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 시편의 위치변화, 갭의 크기변화, 지지관의 두께변화에 따른 온도, 열응력, 변형률의 영향을 평가하였다. 그 결과 시편의 위치를 외통관으로 접근할수록 지지관의 온도뿐만 아니라 변형률이 외통관 내면 변형률과 비교하여 상대적으로 크게 증가하므로 갭이 작아지는 것을 파악하였고 갭의 크기증가는 다른 변화보다 지지관의 온도증가를 일으켜 갭이 작아지는 문제점을 발견할 수 있었다. 지지관의 두께증가는 지지관의 열응력 증가를 일으키지만 허용범위에 충분한 여유를 가지고 있었다. 전체적으로 열응력에 대한 건전성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 강영환 외, "재료 조사시험용 캡슐 및 관련 설비의 안전성 분석보고서", KAERI/TR-985/98
2. 이영신 외, "다공원통형 구조물의 기계적, 열적 성능해석"
3. 배기광 외, "DUPIC 핵연료 조사시험 설계 및 안전성 분석보고서", KAERI/TR-1157/98
4. 박희성 외, "DUPIC 핵연료봉 열적 거동 해석", KAERI/TR-1213/99
5. 강영환 외, "새로운 핵연료 조사시험용 캡슐에 대한 열특성연구", 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2001
6. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Appendix A, 1995
7. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Div. 1, Subsection NB, 1995
8. Bruno A. Boley and Jerome H. Weiner, "theory of thermal stress", John Wiley & Sons, Inc, 1960