

'99추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

집합체덕트의 변형에 기인한 칼리머 노심의 기계적 거동 분석

Core Mechanical Analysis of the KALIMER due to the Deformations of Assembly Ducts

이병운, 황완, 김영진
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로는 높은 온도와 높은 중성자속으로 인하여 집합체덕트의 휨 및 팽윤이 발생한다. 집합체덕트의 휨/팽윤은 반응도, 덕트 건전성, 인출력 등에 영향을 미치게 되므로, 액체금속로 설계시에는 이러한 덕트의 기계적 거동을 수용할 수 있는 방안을 고려하여야만 한다. 본 논문에서는 칼리머 집합체덕트의 재료특성을 CRAMP 코드에 설치하였으며, 집합체덕트의 휨에 영향을 미칠수 있는 노심환경, 재료특성 및 기하학적 조건과 같은 주요 인자들의 영향을 분석하였다. 또한 이들 인자들중 덕트 성능을 저하시키지 않으면서 중성자속, 온도, 압력, 재장전계획 등의 노심환경을 수용하기 위해서는 pad 간격이 가장 주요한 변수였으므로, 덕트 간격을 위주한 민감도분석을 수행하였다.

Abstract

Bowing and swelling of the assembly duct have occurred due to high operating temperature and high neutron flux in LMFBR. Since such deformations can affect the core reactivity change, the integrity of the assembly duct, the withdrawal force etc., the options which can accept the mechanical behavior of the assembly ducts should be considered in the design of LMR. This study analyzes major parameters such as the core environments, the material characteristics, the geometrical conditions by updated CRAMP with the characteristics of duct material for KALIMER. Among these parameters, pad gap is identified as the most important parameter which can accept the core environments (such as flux, temperature, pressure, refueling scheme) without deteriorating the in-reactor performance of the duct. Therefore, the sensitivity analyses mainly associated with pad gap are also carried out.

1. 계론

액체금속로는 높은 온도와 높은 중성자속으로 인하여 집합체덕트의 휨/팽윤이 발생한다. 집합체덕트의 휨/팽윤을 고려하는 액체금속로 노심의 기계적 거동 분석은 특히 접촉력에 의한 덕트의 건전성 유지여부, 반응도 변화, 인출력, 재장전시 직진도, 제어봉 삽입가능성 등을 평가하기 위해 수행된다. 예를 들면 집합체덕트가 노심안쪽으로의 쫄 경우 정(+)반응도계수를 유발할 가능성이 커지며, 덕트간 과다한 접촉력은 덕트의 건전성에 영향을 끼치거나, 재장전시 과다한 인출력이 요구된다. 이외에도 핵연료집합체덕트의 휨은 재장전기계장치 설계시 고려되어야만 하며, 제어봉집합체덕트의 휨은 제어봉의 삽입에 영향을 줄 수 있다. 따라서 이러한 덕트의 기계적 거동을 조절할 수 있는 방안을 도출하여, 재료의 특성이나 덕트의 기하학적 조건을 조정하여야 한다. 노심의 기계적 거동에 영향을 미치는 인자들은 크게 재료 특성 (크립, 팽윤, 열팽창 계수, 탄성을, 마찰계수), 덕트의 기하학적 조건 (pad 간의 거리, pad 높이, 노우즈피스 형태, 덕트 크기, receptacle, 노심지지대, core former) 및 노심 환경 (중성자속 분포, 온도 분포, 압력, 노심 배열, 재장전)등이 있다. 덕트의 아주 작은 설계변화에도 노심의 기계적 거동은 큰 영향을 받을 수 있기 때문에 노심환경을 수용하면서도 안전성 및 노심성능을 향상시킬 수 있도록 덕트설계조건에의 제한치를 설정해두어야만 한다.

본 논문에서는 KALIMER 집합체덕트의 재료특성을 CRAMP 코드에 모델링하였으며, 이를 바탕으로 반응도 및 접촉력의 영향을 만족할 수 있는 방안을 도출하기 위하여 노심환경, 재료특성 및 기하학적 조건이 집합체덕트의 휨에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 액체금속로 노심의 기계적 거동을 수용할 수 있는 방안 도출시 불확실성이 존재하게 되므로 가장 보수적인 조건을 고려하였다. 이에따라 노심의 기계적 거동에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 인자들을 중심으로 중성자속, 온도, 압력, 재장전계획 등의 노심환경을 수용하고 덕트의 성능을 저하시키지 않으면서 노심의 기계적 거동을 만족시킬 수 있는 방안을 분석, 도출하였다.

2. 예비개념 데이터 및 주요 설계요건을 고려한 KALIMER 노심의 기계적 거동 분석

고속로 노심의 기계적거동 휨 분석을 위하여 세계각국은 여러 가지 해석코드를 사용하고 있으며¹⁾, 본 논문에서는 이중 3차원 코드인 CRAMP (Core Restraint Analysis Modeling Program) 코드²⁾를 사용하였다. CRAMP 코드는 영국 AEAT가 개발한 고속로 core mechanics 전문 분석코드로서 현재는 EFR 설계에 사용되고 있다. 입력데이터는 재료 특성, 덕트 구조, 운전 이력, 노심 특성(온도, 중성자속, 압력, 노심배치) 등이 필요하다. 따라서 KALIMER 집합체덕트 재료의 크립 특성을 CRAMP 코드내에 모델링하여 설치한 후, KALIMER 예비개념 데이터를 사용하여 집합체덕트 휨을 우선 분석하였다.

그림 1은 분석에 사용된 KALIMER 노심 배치³⁾를 나타낸다. 현재의 노심배치에 따르면 핵연료집합체는 6개 있으며, IVS가 노심외곽에 배치되어 있다. 여기서 USS는 ultimate shutdown system, DF는 drive fuel, IB internal blanket, RB: radial blanket, CR : control rod, GEM : gas expansion module, BS : B₄C shield, rS : r shield, R : reflector, IVS : in vessel storage 집합체덕트를 나타낸다.

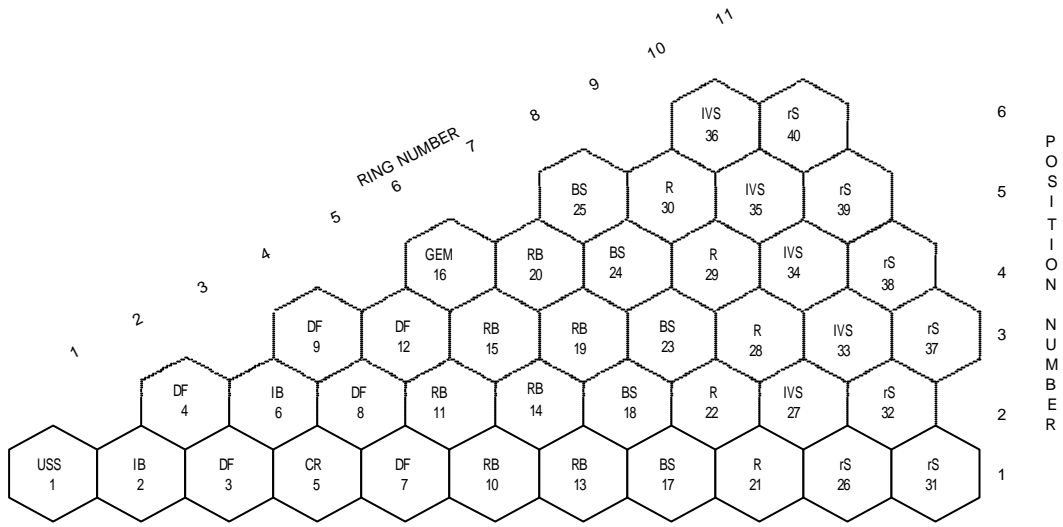


그림 1. KALIMER 노심 배치

그림 2는 분석에 사용된 운전 이력을 나타낸다. 18개월마다 재장전을 수행하며 이때 핵연료 집합체 2개씩을 재장전한다. 핵연료재장전은 보수적인 결과를 얻기 위하여 노심안쪽에 위치한 집합체덕트를 가장 나중에 재장전한다는 가정하에 분석을 수행하였다. + 지점에서는 과도상태하에서의 반응도 변화를, X 지점에서는 접속력을 분석한다.

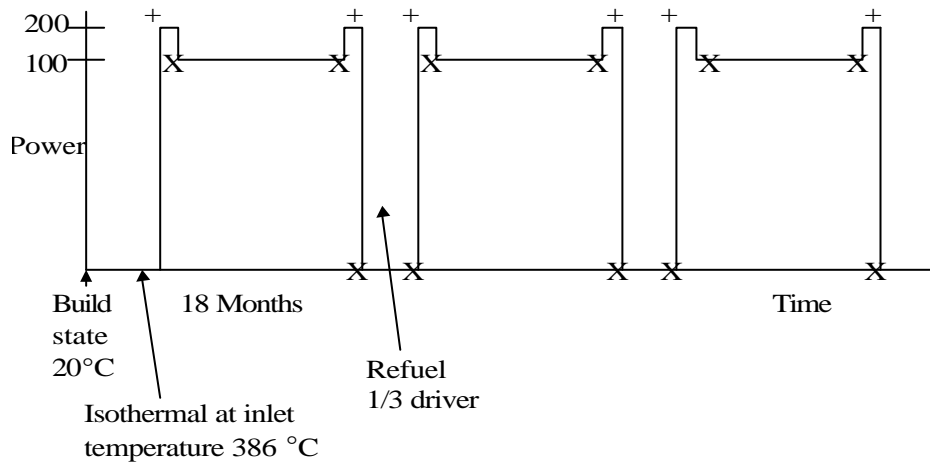


그림 2. 운전 이력

KALIMER 노심 예비분석 결과, 온도차에 따른 열적 휨이 한두개의 덕트에서 크게 일어날 수 있는 구조를 가지고 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 냉각재 압력, 재료 특성, 중성자속에 비례하는 dilation이 크게 일어날 수 있으며, 노심 초기에는 빈 공간인 IVS의 영향으로 출력에 따라 부반응도계수를 가지지만, IVS가 채워졌을 때는 (+) 계수를 가지는 경향을 보였다. 전체적으로 덕트간 접촉력이 작은 편이며, 특히 EOL시 접촉력이 노심 초기보다 매우 약하게 되어, 진동이 유발될 가능성이 크지만 인출력은 상대적으로 줄어든 상태이었다. 노우즈피스 seal에 간극이 없다고 가정하였으므로 노우즈피스의 강성이 매우 커서 휨을 적게하는 효과를 가지고 있었다.

따라서 반응도 및 접촉력에 영향을 미치는 주요 설계변수와 제조상의 공차 등을 평가할 수 있는 분석을 수행하였다. 이들 분석은 설계인자들의 영향과 불확실성을 평가하기 위해 다음과 같이 8가지 경우에 대해 수행되었다. 특히 과도현상의 경우 최적의 재료 조건 및 기하학적 조건을 도출하기 위한 분석과 덕트의 건전성을 유지하기 위한 접촉력 분석에 중점을 두었다. 단 ACLP(Above Core Load Pad)의 위치에 대한 민감도분석은 이미 수행되어 있으므로⁴⁾, 현재 분석에서는 제외되었다. 분석된 설계 인자 및 간단한 결과는 다음과 같다.

- ① TLP(Top Load Pad) 및 ACLP에서의 간격이 386℃에서 0.4mm로 줄어들었을 경우 : 양쪽 pad가 모두 접촉할 가능성을 크게하는 경우로서, 접촉력이 커지게 되고 반응도 계수는 첫 번째 재장전시기 직후에만 (+)값을 가지게 된다.
- ② 노우즈피스 seal에 0.2mm의 간극이 있을 경우 : 제조 및 조립과정에서 간극이 발생하는 경우로서 노우즈피스가 강성을 발휘하기 전에 덕트가 미리 휘는 현상이 발생하고 접촉력이 크게 줄어들며 크릴도 줄어들지만, 반응도는 (+)값을 가진다.
- ③ ACLP에서의 flexibility가 1/2로 줄어들었을 경우 : pad의 flexibility가 커지면 덕트가 외곽으로 밀리므로 반응도계수가 (+)값을 가질 확률이 커지는 경우로서, 현재 주로 한쪽 pad만 접촉하므로 접촉력 및 반응도는 별 영향이 없었지만, 향후 pad간의 간격을 줄일 경우 이에따른 또다른 민감도 분석이 필요하다.
- ④ 노우즈피스 강성이 2배로 늘어났을 경우 : 노우즈피스의 bending stiffness가 작아짐에 따라 덕트가 외곽으로 밀려나가므로 반응도계수가 (+)값을 가질 확률이 커지게 되는 경우로서 덕트가 대부분의 접촉력을 수용하므로 접촉력 및 반응도는 별 영향이 없었으나, 강성을 크게 줄이는 경우 휨이 너무 커질 수 있는 문제가 발생할 가능성이 있다.
- ⑤ 크릴 효과를 1/2로 줄였을 경우 : 크릴 방정식의 불확실성을 평가하는 경우로서 접촉력 및 반응도는 별 영향이 없으나 dilation이 1/2로 줄어들어 노심중앙에서의 덕트간 접촉이 없어졌다.
- ⑥ 모든 덕트가 초기에 휨을 가지는 경우 : 제조 및 조립과정에서 약 5mm까지의 휨이 가능한 경우로서 이 경우 접촉력은 전체적으로 증가하며 반응도는 휨 방향에 따라 다르지만 전체적으로 별 영향이 없었다.
- ⑦ IVS 위치에 dummy duct를 채웠을 경우 : 접촉력에는 별 영향이 없었으나 반응도 계수는 초기부터 덕트가 노심 외부쪽으로 휘어질 수가 없으므로 계속 (+)값을 가지게 된다.
- ⑧ TLP 및 ACLP 간격이 줄어들고 노우즈피스 seal에 간극이 있을 경우 : 서로 반대효과를 일으키는 두가지 경우를 조합 분석하는 것으로서 접촉력이 전체적으로 증가하고 널리 분포되어 있으므로 진동효과를 감소시킬 수 있음. 또한 반응도계수가 전체적으로 (-)값을 가지게 되므로 제조과정에서 일어나는 공차 수용이 가능하였다.

이들 분석을 종합한 반응도 추세 및 최대 접촉력은 그림 3 및 표 1과 같다.

y
t
l
v
l
l
c
a
e
l

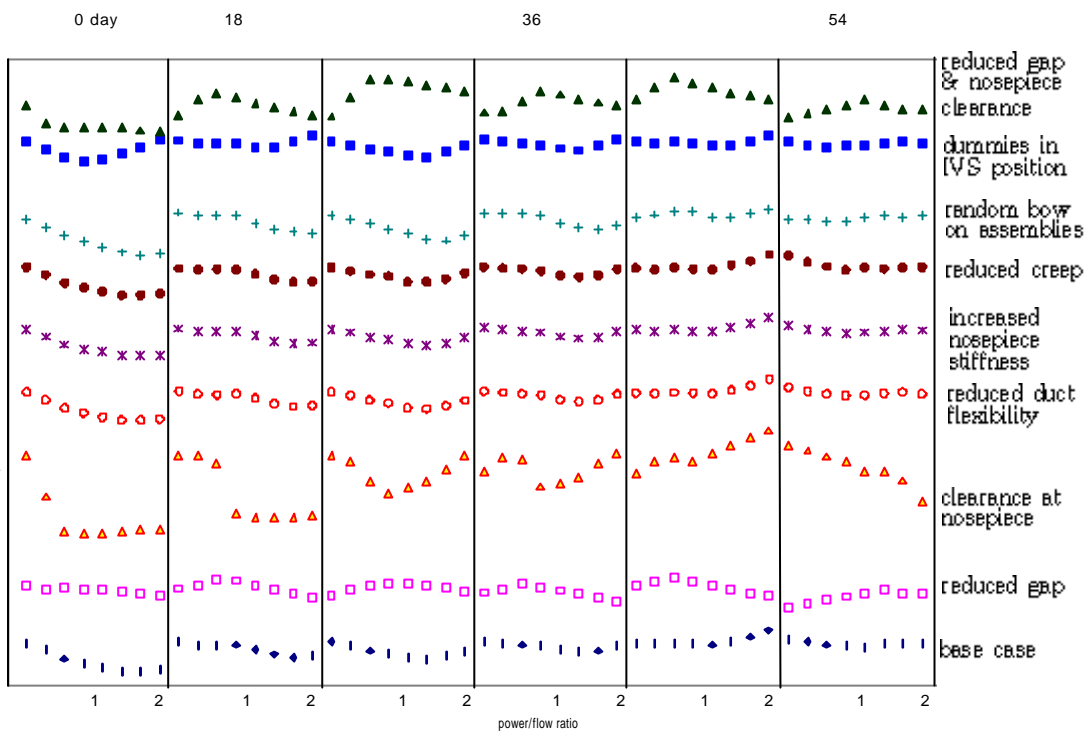


그림 3. 설계 인자들을 고려한 반응도 변화 추세

표 1. 설계인자들을 고려한 최대 접촉력

	0 day,			18 ,			18 ,			54 ,		
	L	U	B	L	U	B	L	U	B	L	U	B
base-case	2.1	1.4	3.9	0.1	0.07	.95	.41	.47	4.4	.07	.06	2.4
reduced gap	3.4	1.9	5.3	0.6	0.4	1.7	1.6	1.5	3.1	0.9	0.4	2.6
clearance at bushes	1.2	0.7	2.9	0.03	0.02	0.3	0.07	0.04	0.8	0.1	0.09	0.07
reduced duct X/S flexibility	2.1	1.4	3.9	0.1	0.06	0.95	0.4	0.5	3.7	0.07	0.05	2.4
increased nosepiece stiffness	2.1	1.4	4.2	0.1	0.07	1.0	0.39	0.47	4.9	0.07	0.06	2.6
reduced creep	2.1	1.4	3.9	0.3	0.17	1.4	0.2	0.3	4.7	0.1	0.07	0.8
reduced gap & bush clearance	2.9	2.5	1.8	0.4	0.3	0.4	1.7	1.1	0.9	0.5	0.3	0.1
dummies in IVS positions	2.1	1.4	3.9	0.1	0.07	.95	.41	.47	4.4	.06	.06	2.4
random bow on assemblies	2.5	1.4	6.6	0.3	0.2	3.3	0.5	0.6	5.4	0.1	0.1	2.6

where L: ACLP, U: TLP, B: nosepiece

그림 3의 반응도는 정량적으로 정확한 값을 나타내지는 않지만 핵연료집합체덕트의 휨에 따른 영향을 나타내는 것으로 그 정성적인 추세는 정확하다. 따라서 고유안전성을 위해서는 과도현상시 부반응도 추세를 가지도록 설계를 해야 한다. 현재까지의 분석결과 pad간 간격을 줄였을 경우 가장 좋은 부반응도 추세를 나타내는 것으로 보이며, 다른 인자들은 간격을 줄이지 않았을 경우에는 반응도추세 변화가 심하지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 pad간의 간격을 줄였을 경우에 민감도 분석이 필요하다는 것을 알 수 있다.

그러나 최대접촉력은 간격이 줄어드는 경우 커지기 때문에 덕트의 건전성 및 지지구조물의 하중부담이 발생하게 된다. 따라서 pad의 간격을 줄여야만 하지만 접촉력문제가 따르기 때문에, 안전성 및 건전성을 동시에 만족시킬수 있도록 설계 고려사항들에 대한 제한요건을 도출하기위해 민감도분석을 수행하였다.

3. Pad 간격변화를 중심으로한 집합체덕트의 기계적 거동 분석

현재까지의 분석결과, 노심의 기계적 거동을 수용하기 위해서 가장 큰 영향을 미치는 것은 pad 간의 간격이라는 것을 알 수 있었다. 또한 실질적으로 설계, 제작되는 경우 노우즈피스와 receptacle 사이의 간격은 제조공차에 의해 발생하게 된다. 이에따라 노심의 반응도를 고려할 때 pad간 간격은 줄여야 하기 때문에, 노우즈피스 간격 발생을 0.2mm로 고려하면서 pad 간 간격을 줄였을 때의 영향을 분석하였다.

그림 4는 pad간의 간격이 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1mm인 경우에 대한 노심의 반응도 변화 추세를 나타낸다. 반응도는 pad간의 간격이 작으면 작을수록 과도현상시 부반응도 추세를 보인다는 것을 알 수 있다. 또한 어느정도의 간격(현재 분석상에서는 0.4mm)이상이 되면 반응도 추세변화가 만족스럽지 못하다는 것을 알 수 있다. 반응도추세변화를 만족시키는 것은 고유안전성을 위해 매우 중요한 조건이며 또한 출력 대 유량비가 1을 넘어가기 전에 부반응도 변화추세를 보이는 것이 보수적이므로 현재분석결과 0.4mm 이내로 해야만 한다는 것을 알 수 있다.

또한 덕트간 간격에 대한 TLP, ACLP, 노우즈피스에서의 접촉력은 그림 5, 6 및 7과 같다. 이는 BOL에서 전출력시, 18개월후 전출력시, 18개월후 출력정지시, 54개월후 전출력시의 접촉력으로서 그외의 기간에서는 같은 조건에서 유사한 접촉력크기를 보여준다. 그림 5, 6에서 보는 바와 같이 pad간의 간격이 작으면 작을수록 접촉력이 매우 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이는 반응도변화추세와 반대되는 고려조건이며, 접촉력이 크면 덕트를 지지하는 구조 및 덕트 자체의 건전성을 유지하도록 해야하므로 접촉력은 작은 것이 좋다. 그러나 그림 7에서 보는 바와 같이 노우즈피스에서의 접촉력은 pad간 간격이 어느 정도 이상되면 최고치가 되었다가 다시 줄어드는 경향을 보이고 있다. 그러므로 역시 어느 정도이상의 pad간 간격은 좋지않다는 것을 알 수 있다.

또한 그림 8은 재장전시 인출력을 나타낸다. 현재의 분석에서는 보수적인 결과를 얻기 위해 노심 안쪽에 있는 핵연료집합체덕트를 가장 늦게 재장전하는 경우를 분석하였다. 인출력은 덕트의 자중 및 마찰력을 이겨내는 힘에 비례하기 때문에 결국은 pad간의 접촉력과 대단히 큰 관계가 있다. 따라서 pad간의 간격이 작을수록 인출력도 크게 나타나지만, 1.0mm이상되는 경우에는 인출력이 3번째 재장전구간에서 최고치를 기록하는 것처럼 어느정도 이상의 간격을 넘어가면 안된다는 것을 알 수 있다.

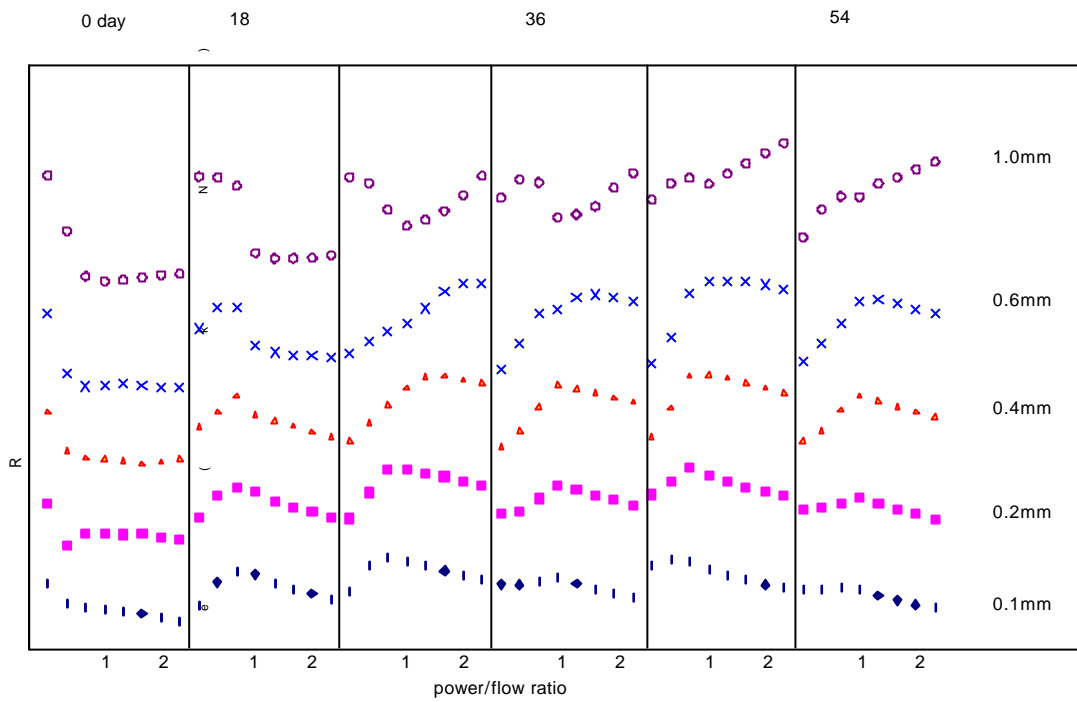


그림 4. Pad간 간격을 변화시켰을 때 반응도 변화 추세 비교

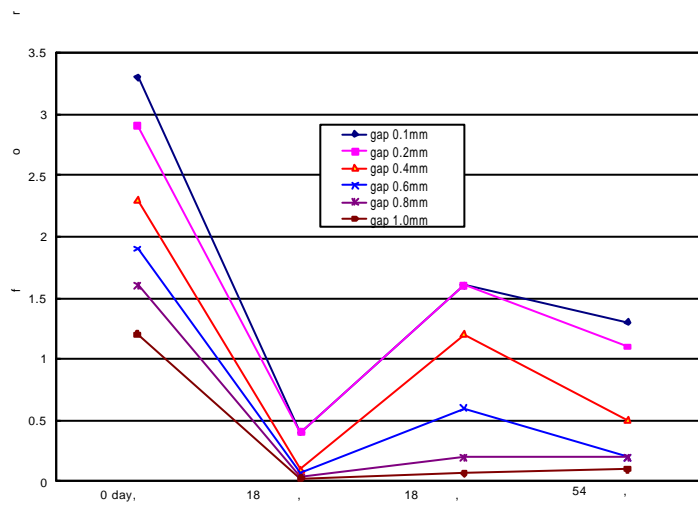


그림 5. ACLP에서의 간격에 따른 접촉력 비교

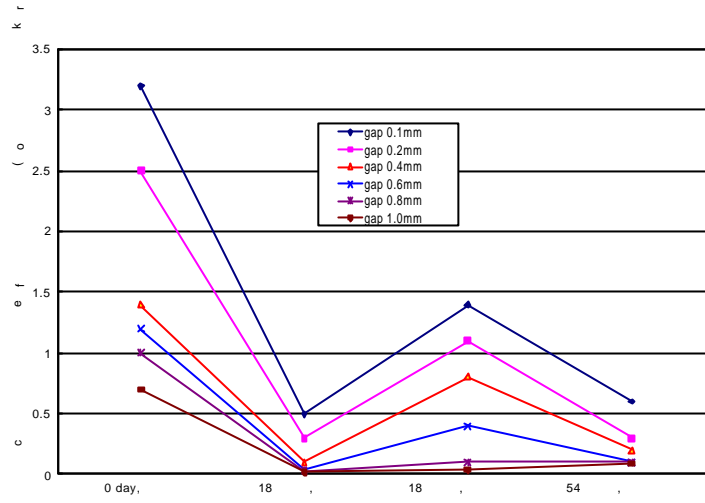


그림 6. TLP에서의 간격에 따른 접촉력 비교

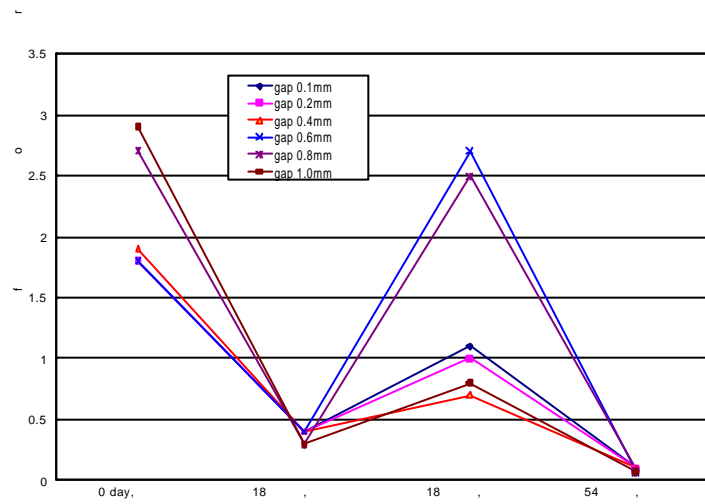


그림 7. 노우즈피스에서의 간격에 따른 접촉력 비교

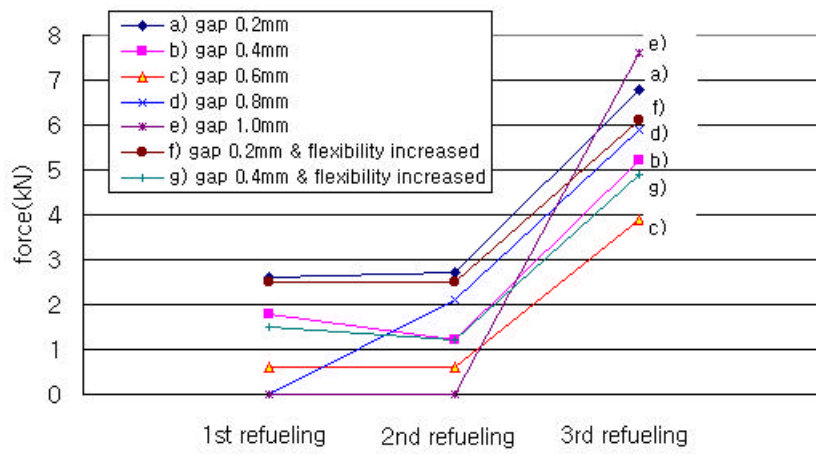


그림 8. 재장전시 인출력 비교

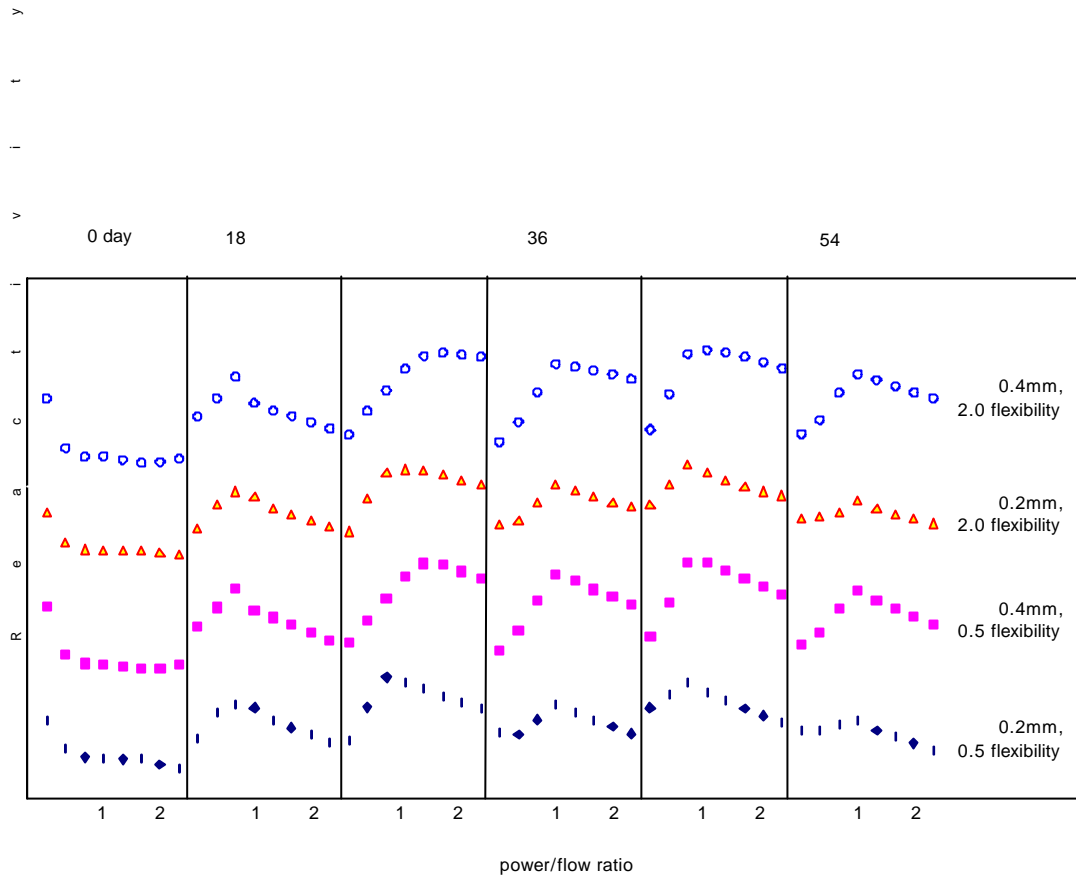


그림 9. flexibility를 변경시켰을 경우 반응도 변화 추세 비교

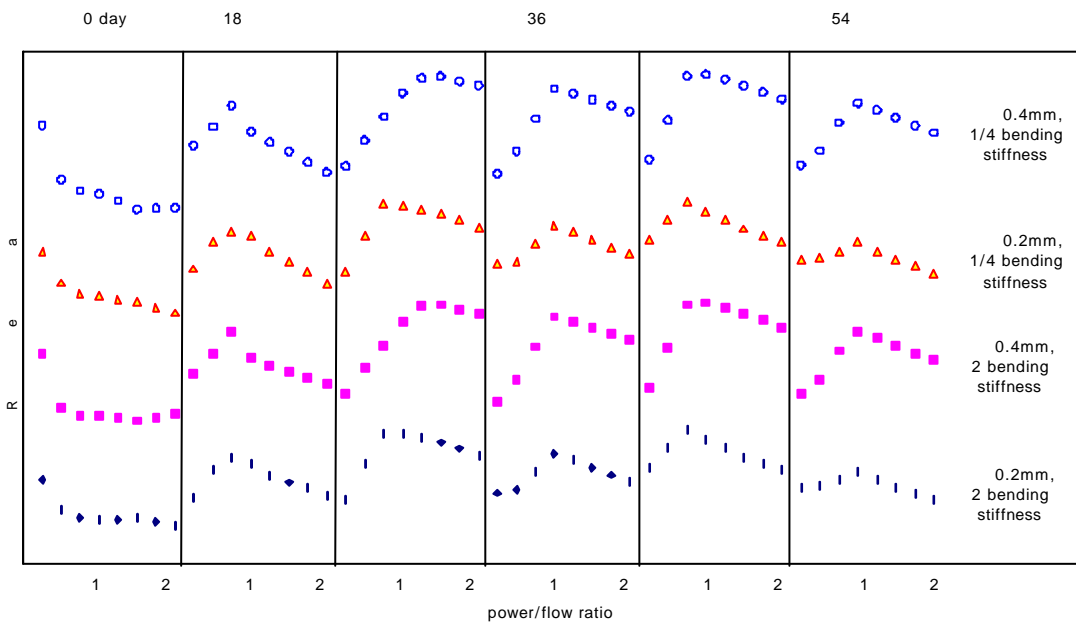


그림 10. 노우즈팁스 bending stiffness를 변화시켰을 경우 반응도 변화 추세 비교

따라서 반응도 추세를 만족시키기 위해 pad 간 간격을 0.4mm 이내로 하면서 이들 접착력 및 인출력을 감소시킬 수 있는 방안을 도출하여야 한다.

그림 9는 ACLP의 flexibility를 변경시켰을 경우의 반응도 추세를 나타낸다. flexibility가 커지면 더 좋은 반응도변화추세를 보인다는 것을 알 수 있다. 이는 덕트를 외부로 밀어내는 경향이 더욱 더 커져 부반응도를 가지게 하기 때문이다. 따라서 앞으로 덕트의 설계시에는 pad의 flexibility를 더욱 더 커지게 하는 방향으로 설계를 해야 할 것이다.

그림 10은 노우즈피스 강성도를 변화시켰을 경우의 반응도 추세를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 노우즈피스의 강성도가 작아지면 작아질수록 반응도 추세가 좋아진다는 것을 알 수 있다.

그러나 강성도변화에 따른 접착력의 변화는 그다지 크기 않았다. 하지만 그림 8의 인출력에서 보는 바와 같이 pad의 flexibility를 크게 하였을 경우에는 인출력이 매우 크게 줄어드는 것을 알 수 있었다. 따라서 앞으로 덕트의 설계시에는 pad의 flexibility를 크게하는 방안을 강구하여야 할 것이다.

4. 결론

칼리머노심 집합체덕트에 대한 기계적인 거동을 분석하기 위해서 예비개념 자료를 사용한 경우와 기계적거동에 영향을 미치는 8가지 경우(① TLP(Top Load Pad) 및 ACLP에서의 간격이 386°C에서 0.4mm로 줄어들었을 경우, ② 노우즈피스 seal에 0.2mm의 간극이 있을 경우, ③ ACLP에서의 flexibility가 1/2로 줄어들었을 경우, ④ 노우즈피스 강성이 2배로 늘어났을 경우, ⑤ 크립 효과를 1/2로 줄였을 경우, ⑥ 모든 덕트가 초기에 힘을 가지는 경우, ⑦ IVS 위치에 dummy duct를 채웠을 경우, ⑧ TLP 및 ACLP 간격이 줄어들고 노우즈피스 seal에 간극이 있을 경우)에 대해 반응도 및 접착력을 고찰하였다.

이들 중 가장 큰 영향을 미치는 것은 Pad 간 간격으로 나타났으므로, 이를 중심으로 다시 민감도 분석을 수행하였다. 분석을 수행한 결과, pad간의 간격에는 상한치가 존재하고 있었으며, 이는 노심환경에 따라 틀려질 수는 있지만 현재의 1mm 간격에서 0.4mm 간격정도로 감소시켜야 된다는 것을 알 수 있었다. 또한 노우즈피스와 receptacle사이에는 제조공차 때문에 간격이 항상 존재하며, 이는 안전성에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 덕트간의 간격조정 등 여러 가지 조건을 고려하여 이를 보정하여야 할 것이다. Pad의 강성도는 현재 만족할 만한 수준이지만 클수록 과도현상시 부반응도를 유지할 수 있고, 노우즈피스의 휨 강성도는 만족할 만한 수준이지만 작을수록 과도현상시 부반응도를 유도하므로 앞으로 노심의 기계적 거동해석시 주요한 인자가 될 수 있다. 덕트의 크립은 작아지면 dilation을 매우 작게 하지만, 너무 작아지면 덕트의 힘을 보상하기에 힘들어지므로 현재의 크립을 유지하거나 조금 더 작은 재료를 선택해야 한다는 것을 알 수 있었다.

이와같이 본 논문에서는 KALIMER 노심의 기계적 거동해석 및 주요 설계인자들의 민감도분석을 통하여 노심환경 및 지지구조를 수용하면서 안전성 및 건전성을 유지할 수 있는 방안들을 분석하였다. 즉 중성자속 분포, 온도 분포, 압력분포, 노심배열, 운전이력과 같은 노심환경 및 지지구조, 제조공차를 수용할 수 있는 방안을 분석하였으며, 고속로심의 기계적 거동 해석시 큰 영향을 미칠수 있는 집합체덕트의 재료 특성 및 기하학적 조건에 대한 제한요소 및 설계고려사항을 도출하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. IWGFR, "Verification and Validation of LMFBR Static Core Mechanics Code", IWGFR/75, IAEA, 1990
2. R.C. Perrin, J.C.Duthie, The Core restraint modeling program-CRAMP part 1 : general description and user manual, NFL-R-2030(S) part 1, UKAEA, August 1989
3. 황 완 외 25인, "미래형핵연료 개발-금속핵연료설계개발-", KAERI/RR-1887/98, 한국원자력연구소, 1998
4. 이병운 외 3인, "KALIMER 집합체덕트의 휨 분석" '98 한국원자력학회 추계발표회논문집, 1998