

2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

집합체덕트의 열기계적거동에 따른 반응도변화추세평가 및 인출력해석 모델개발

The Development of the analysis models for the Reactivity Change and the
Withdrawl Force by the Thermo-Mechanical Behavior of the Assembly Ducts

이병운, 이동욱, 권형문, 김영일
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고속로의 열기계적 거동해석 목적은 덕트 건전성 유지를 위한 Pad간 접촉력 평가, 부반응도 유지를 위한 반응도 평가, 재장전시 인출력 평가, 재장전 및 노심재배치를 위한 덕트 상단의 휨 평가, 및 제어봉 삽입 가능성 평가 등으로 크게 구분할 수 있다. 본 논문에서는 인출력 모델뿐만 아니라 반응도 평가를 위한 모델을 개발하여 NUBOW2D-KMOD에 설치하였다. NUBOW2D-KMOD에 의한 민감도 분석결과를 CRAMP 코드와 비교하였으며, 또한 부반응도를 유지할 수 있는 집합체덕트간 pad 간격을 도출하였다.

Abstract

The thermo-mechanical analysis of the assembly ducts for Fast Reactor are mainly performed to evaluate the change of reactivity, the force at pads on core assemblies, the withdrawal force at refueling, the loading and refueling deviation of assembly ducts, and the bowing modes for control assembly. In this paper, the model for the evaluation of reactivity change trends as well as that of the withdrawl force were developed and inserted into NUBOW2D-KMOD. The sensitivity analyses results of NUBOW2D-KMOD were compared with those of CRAMP code, and the gap size between pads was also derived to keep the negative reactivity trends.

1. 개요

액체금속로는 높은 중성자속 및 고온으로 인하여 집합체 휨이 발생하여 접촉 및 변형이 일어나게 된다. 이와 같은 집합체덕트의 기계적 거동은 반응도, 접촉력에 영향을 주기 때문에 노심 안전성 및 집합체덕트 건전성 측면에서 기계적 거동을 해석해야만 한다. 즉 KALIMER의 열기계적 거동해석 목적은 덕트 건전성 유지를 위한 Pad간 접촉력 평가, 부반응도 유지를 위한 반응도 평가, 재장전시 인출력 평가, 재장전 및 노심재배치를 위한 덕트 상단의 휨 평가, 및 제어봉 삽입 가능성 평가 등으로 크게 구분할 수 있다. 이 중에서 반응도 및 인출력 해석이 안전성에 큰 영향을 미치고 있는 데, 이는 집합체가 노심 안쪽으로 휘어 추가적인 정반응도를 줄 수도 있으며, pad간 접촉마찰력에 의해 재장전시 덕트 자중이외에도 2-3배의 인출력이 필요할 수도 있어 핵연료재장전 기계가 파손될 수도 있기 때문이다.

따라서 이런 조건들을 고려하여 집합체덕트를 설계하여야 하지만, 위의 모든 조건을 만족시키기는 매우 어렵다. 즉 재료의 특성이나 덕트의 기하학적 조건을 조정하여 기계적 거동을 수용할 수 있는 방안을 고려하여야만 한다. 또한 덕트의 작은 설계변화에도 기계적 거동이 큰 영향을 받을 수 있으므로 주요 설계인자들을 중심으로 노심환경을 수용하면서도 안전성 및 덕트 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 분석하여야 한다.

본 논문에서는 집합체덕트의 열기계적 거동이 부반응도를 유지하여 노심의 안전성을 유지할 수 있도록 설계하는 데 중점을 두었다. 이를 위하여 현재 보유하고 있는 NUBOW2D-KMOD 코드내에 인출력해석 모델을 설치하고 인출력 민감도 분석을 수행하였다. 또한 NUBOW2D-KMOD 코드내에 반응도 평가 모델을 개선한 후 반응도추세를 고려한 열기계적 거동을 평가하였으며 결론적으로 부반응도를 유지할 수 있는 집합체덕트의 설계제원을 제시하였다.

2. 덕트 인출력 모델링 개발

2.1 개요

집합체덕트 인출력 해석은 집합체덕트의 열기계적 거동해석중 중요한 안전성 현안중의 하나이다. 핵연료재장전기계의 파손을 막기 위해서는, 핵연료재장전기계는 집합체덕트 자체의 자중을 포함하여 각 접촉면에 적용하는 힘 이상의 인출력을 가지고 있어야 한다.

현재 보유하고 있는 NUBOW2D-KMOD에는 인출력을 해석하는 모델이 설치되어 있지 않으므로, NUBOW2D-KMOD 코드내 인출력해석 모델을 설치하였다. 인출력은 접촉면에 적용되는 힘과 마찰계수 및 덕트 무게에 대한 함수이므로, 상단취급소

켓, ACLP 및 노우즈피스에 적용되는 접촉력을 계산하였다. 또한 인출력 계산시에는 재장전 온도를 사용하여야 하기 때문에, NUBOW2D-KMOD내에 설치하였던 IREFUEL 모드를 이용하였다[1].

NUBOW2D-KMOD에서는 row에 대한 평균값을 이용하므로 집합체덕트의 변수 범위를 결정하기 위해 인출력 분석에 사용될 수 있다. 또한 분석된 인출력을 CRAMP 코드[2]의 해석결과와 비교하였다.

2.2 인출력 모델링

덕트를 인출하는 힘을 구하기 위해서는 각 접촉면의 6개 방향에 작용하는 힘을 모두 이용하여야 한다. 현재 NUBOW2D-KMOD에서는 row에 대한 평균값을 이용하므로 정확한 분석은 이루어질 수 없으나, 집합체덕트의 열기계적 거동 해석을 위한 2차원코드는 설계변수의 신속한 판단 및 설계인자 범위 결정이 주요한 장점이므로, NUBOW2D-KMOD는 덕트 인출력을 분석하기 위한 변수 범위를 결정하기 위해 사용될 수 있다.

인출력은 접촉면에 적용되는 힘과 마찰계수 및 덕트 무게에 대한 함수이다. 이를 수식으로 간단히 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_W = [\mu_1 F_{n1} + \mu_2 F_{n2} + \mu_3 F_{mc} + \mu_4 F_{ACLP} + \mu_5 F_{TLP}] + W_D \quad (1)$$

- F_W : withdrawl force
- F_{n1} : 노우즈피스 하단에 작용하는 힘
- F_{n2} : 노우즈피스 상단에 작용하는 힘
- F_{mc} : 노심중앙(mid-core)에 작용하는 힘
- F_{ACLP} : ACLP에 작용하는 힘
- F_{TLP} : 상단취급소켓에 작용하는 힘
- μ_i : 각 접촉점에서의 마찰 계수
- W_D : 나트륨내에서의 덕트 하중

인출력 계산시에는 재장전 온도를 사용하여야 하기 때문에, NUBOW2D-KMOD내에 설치하였던 IREFUEL 모드를 이용한다[1]. 마찰계수에 대한 정확한 값을 얻기는 어려우므로, 마찰계수를 임의로 일정하다고 보고 전체 접촉면에 미친 힘을 인출력 분석에 사용한다[3].

2.3 접촉면 하중

집합체덕트의 6개 방향 접촉면에 작용하는 인출력은 다음과 같이 정의될 수 있다 (그림 1 참조)[4].

$$F = Q - P + 6S \quad (2)$$

P, Q : resultant inward and outward force acting on each 60sector of Row j

F : net outward force acting on a load point

S : circumferential force acting on beam of Row J

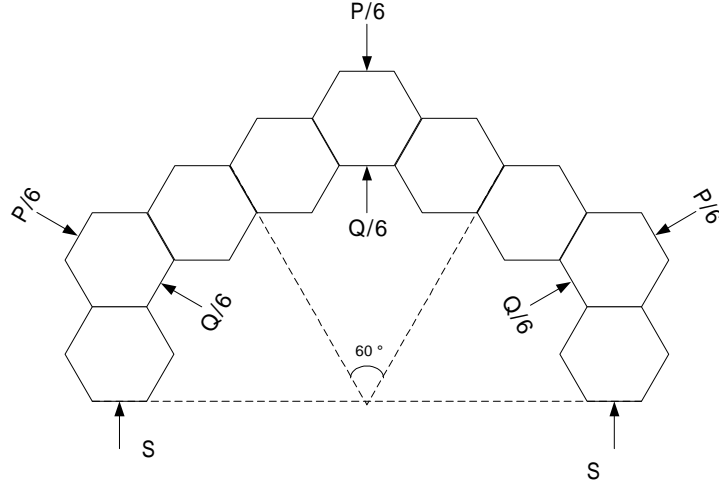


그림 1. 접촉면 힘 상관관계도

상단취급소켓, ACLP 및 노심중양에 작용하는 힘은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P_{ij} = k_{sm}(V_{ij} + VB_{ij} - V_{ij-1} - VB_{ij-1} - D_{gap}) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = P_{ij-1} \quad (4)$$

$$S_{ij} = k_{sp}(D_{cler}(J-1) \times (1 + \alpha T_i) - RP - V_{ij} - VB_{ij}) / 2(J-1) \quad (5)$$

여기서

P : inward force

Q : outward force

S : circumferential force

k_{sm} : combined contact stiffness

k_{sp} : contact spring stiffness

V : pre-bow displacement

VB : mechanical bow displacement

D_{gap} : interduct gap

D_{cler} : outside duct dimension at load planes including load pad thickness

α : thermal expansion coefficient

T_i : temperature at i-th node

RP : hot radial position

J : row number.

노우즈페이스에 작용하는 힘은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P_{ij} = K_{ss}(V_{ij} + VB_{ij} - DELR_{ij}) \quad (6)$$

$$Q_{ij} = K_{ss}(V_{ij} + VB_{ij} + DELL_{ij}) \quad (7)$$

여기서 DELR : right support clearance

DELL : left support clearance

k_{ss} : contact stiffness

V : pre-bow displacement

VB : mechanical bow displacement

3. 기계적 거동에 따른 반응도 평가 모델 개선

각 집합체덕트별 단위길이당 반응도 변화 입력에 의한 해석은 2D코드의 특성상 각 집합체별 반응도입력시 row average값을 적용해야 하며, 3D 코드의 경우 많은 입력데이터 및 시간이 필요하다. 또한 NUBOW2D-KMOD내에서 반응도를 직접 계산하는 모듈은 신뢰도가 부족하다. 이에 따라 NUBOW2D-KMOD내에서 반응도변화가 가장 크게 나타나는 집합체덕트에 대하여 반응도 변화를 결정하는 반응도추세 평가가 가장 타당하다고 분석되어 반응도추세를 분석할 수 있도록 NUBOW2D-KMOD내에 반응도추세 모델링을 설치하였다.

NUBOW2D-KMOD 코드의 기존 반응도 평가모델은 각 덕트별로 단위길이당 반응도 변화를 입력하여 반응도를 평가하도록 되어있다. 그러나 각 집합체덕트별 단위길이당 반응도 변화 입력에 의한 해석은 현재 곤란한 실정이다. 2D코드의 특성상 각 집합체별 반응도입력시 row average값을 적용해야 하며, 다른 반응도 전문계산 코드를 사용하여 모든 집합체덕트별 반응도 및 row average값을 구해야만 하기 때문이다. 또한 3D 코드인 CRAMP에서도 모든 집합체별 반응도를 입력하여 이는 각 집합체의 모든 반응도를 입력하여야 하기 때문에 많은 입력데이터 및 시간이 필요하여 상세설계 단계가 아닌 개념설계 단계에서는 불필요하다고 볼 수 있다.

또한 NUBOW2D-KMOD내에서 반응도를 직접 계산하는 모듈은 단순히 반응도가 중성자속의 제공에 비례한다는 가정이며 현재까지 검증할 수 없는 실정이므로 신뢰도가 부족하다고 볼 수 있다.

따라서 개념설계 단계에서는 반응도변화가 가장 크게 나타나는 집합체덕트에 대하여 반응도 변화를 결정하는 반응도추세 평가가 가장 타당하다고 볼 수 있다. 즉

NUBOW2D-KMOD내에 집합체덕트의 휨 및 반응도에 비례하는 방정식 (8)을 설치하고 집합체덕트의 열기계적 거동에 따른 반응도 변화를 평가하였다.

$$\Delta \mathbf{r} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (w_{xij} u_{ij}) \quad (8)$$

여기서 w_{xi} : displacement reactivity worth/unit length
 u_{ij} : lateral displacement
 M : row
 N : node

4. 해석결과 및 검토

4.1 인출력 해석결과

540일 경과시 NUBOW2D-KMOD 및 CRAMP에 의해 계산한 집합체덕트 인출력은 그림 2와 같다. 최대 인출력은 구동핵연료 SA2번을 인출할 경우 약 10,000N이 필요하며, 재장전계획시 SA2번을 인출하지 않는 경우에는 블랭킷연료 SA3번이 최대가 되어, 이때 약 6500N이 필요한 것으로 나타났다. 마찰력이 0.4일 경우 최대 인출력은 집합체자중을 제외하고 구동핵연료 SA2번을 인출할 경우 약 4,000N 필요한 것으로 나타났다.

ACLP위치에 따른 인출력은 그림 3과 같다. 현재의 ACLP 위치에서 100mm 상향조정한 결과는 최대 인출력의 결과보다 약간 높으며, 200mm를 상향조정하더라도 유사한 경향을 보였다. Pad 간격에 따른 인출력은 그림 4와 같다. Pad 간격이 넓어짐에 따라 접촉력이 줄어들어 인출력은 줄어들게 되지만, 부반응도를 확보할 수 있는 지에 대한 민감도 분석이 필요하다.

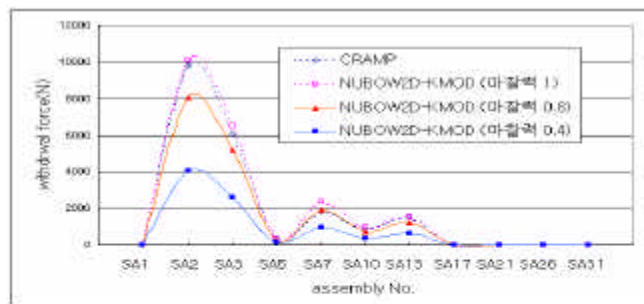


그림 2. 인출력해석결과 비교

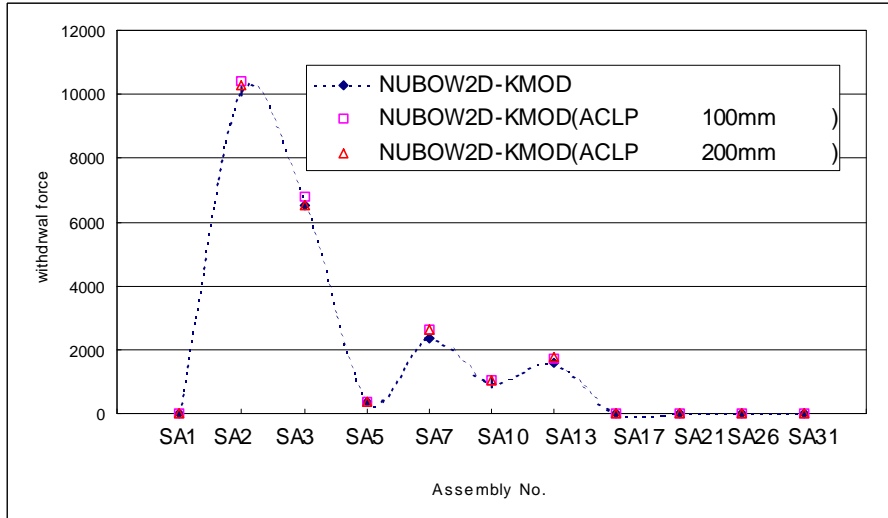


그림 3. ACLP 위치에 따른 인출력

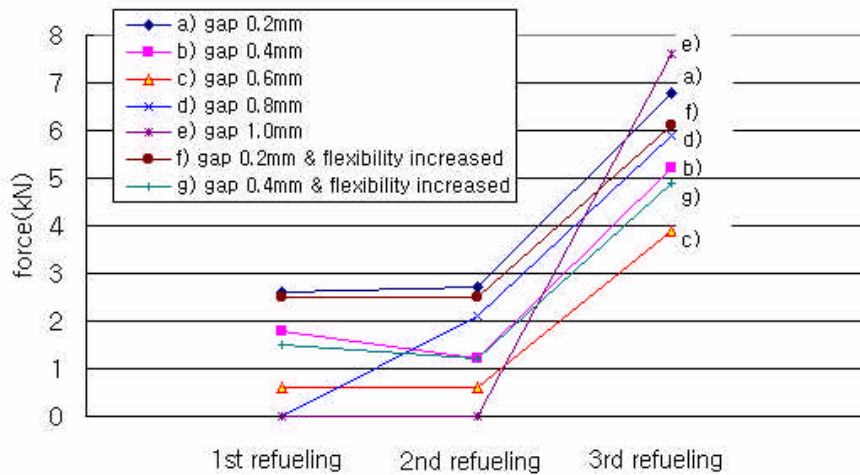


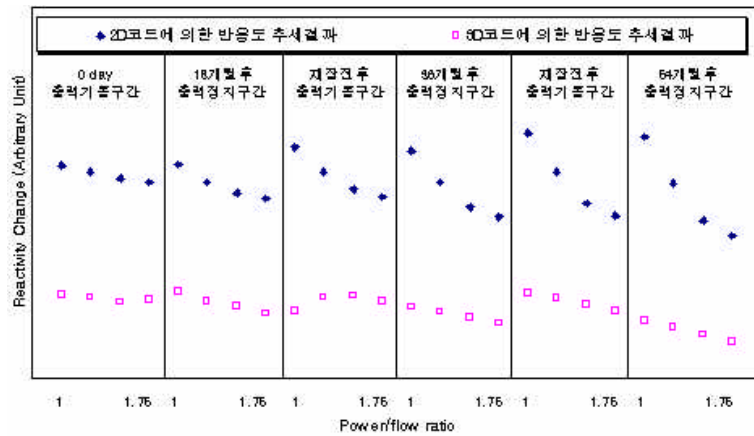
그림 4. Pad간격에 따른 인출력 비교

4.2 반응도 추세분석 결과

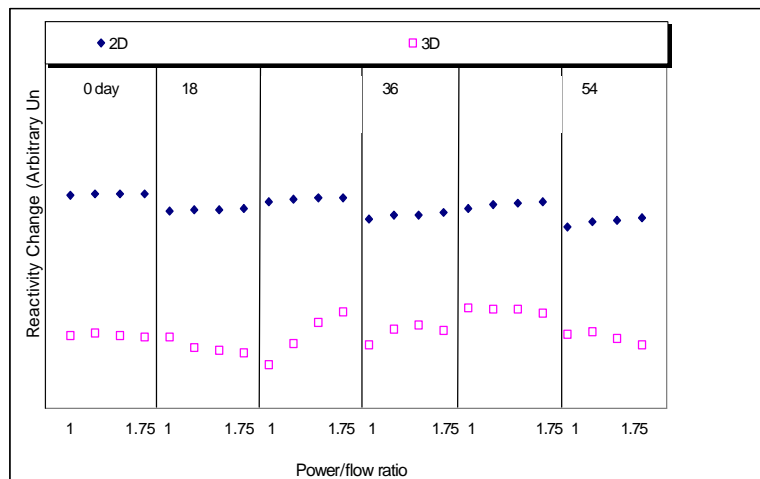
반응도에 가장 큰 영향을 미치는 설계인자는 pad간 간격이었기 때문에[5] 설치된 모델링에 의해 pad간 간격에 따른 반응도추세를 분석하고, 또한 3차원 코드인 CRAMP코드와 반응도 추세 비교와 비교하였다(그림 5). 그림 5에서 보는 바와 같이 Pad간 간격이 1mm일 경우, 상단취급소켓에서의 접촉이 많아지게 되어 정반응도 추세를 보일수 있으며, Pad간 간격이 0.4mm일 경우, 상단취급소켓 및 ACLP (Above Core Load Pad)에서 접촉이 이루어져 부반응도 추세를 보일 수 있다는 것을 알 수 있다.

즉 그림 6, 7에서 보는 바와 같이 양쪽 pad가 접촉할 가능성이 크도록 간극을 줄이는 것이 휨모양이 일직선형태를 나타내며, 부반응도 추세를 유도하기 좋은 형태가 된다, 그러나 간극이 작아지면 접촉력이 커지기 때문에 덕트의 건전성에 대한 민감도 분석이 필요하게 된다.

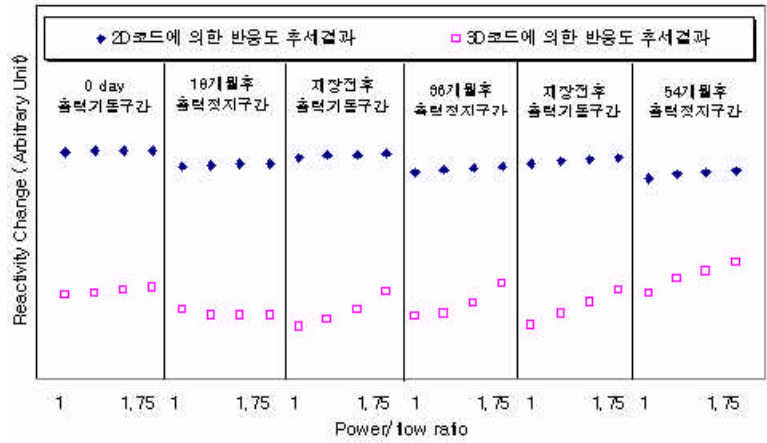
결론적으로 향후 집합체 Spec 혹은 재료특성이 변경되는 경우, 재분석을 수행하여야 하지만, 현재까지 결과로는 여러가지 집합체 제원에서 Pad간 간격이 0.4mm가 가장 타당할 것으로 분석되었다.



(a) Pad간 간격이 0.4mm인 경우 반응도 추세



(b) Pad간 간격이 0.6mm인 경우 반응도 추세



(c) Pad간 간격이 1.0mm인 경우 반응도 추세

그림 5. Pad 간격에 따른 반응도 추세 비교

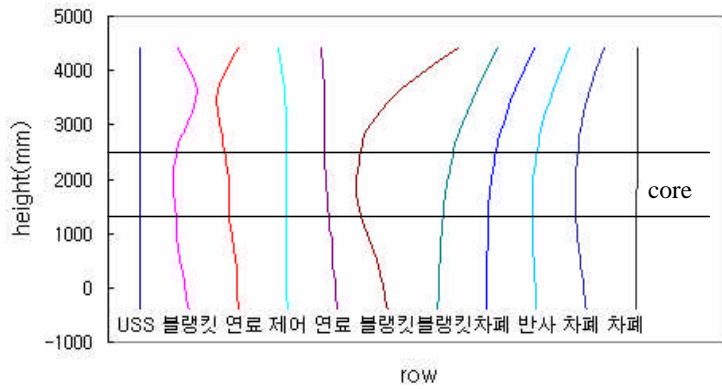


그림 6. 간극이 클 경우 접촉 형태 (예)

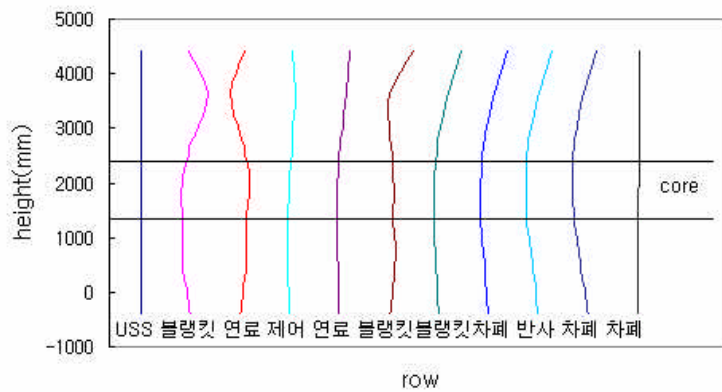


그림 7. 간극을 줄였을 경우 접촉 형태 (예)

5. 결론

KALIMER는 높은 중성자속 및 고온으로 인한 집합체덕트의 휨에 의해 집합체덕트에 접촉 및 변형을 일으킨다. 이는 노심 안전성 및 집합체덕트의 건전성에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 집합체덕트의 열기계적 거동을 해석하여 노심안전성 및 집합체덕트 건전성을 확보해야만 한다.

본 논문에서는 NUBOW2D-KMOD코드내에 인출력 모델뿐만 아니라 반응도 평가를 위한 모듈을 설치하였다. 이에따라 반응도추세, 인출력 등을 평가하였으며, 3차원 코드인 CRAMP코드와 이들 결과를 비교하였다.

특히 반응도 추세에 가장 영향을 미친다고 판단되는 Pad간 간격에 따른 반응도추세를 분석한 결과 Pad간 간격이 1mm일 경우, 상단취급소켓에서의 접촉이 많아지게 되어 정반응도 추세를 보인다는 것을 알 수 있었다. 또한 Pad간 간격이 0.4mm일 경우, 상단취급소켓 및 ACLP (Above Core Load Pad)에서 접촉이 이루어져 부반응도 추세를 보인다는 것을 알 수 있었다.

향후 집합체 제원 혹은 재료특성이 변경되는 경우, 재분석을 수행하여야 하지만, 현재까지 결과로는 여러가지 집합체제원에서 Pad간 간격이 0.4mm가 가장 타당할 것으로 판단된다. 즉 상세설계 단계에서는 더욱 더 민감한 분석을 통하여 pad간 간격을 정밀하게 조정하여야 하지만, 0.4mm 간격으로 충분히 부반응도를 유지할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] B.O.Lee et al., NUBOW2D-KMOD Program User's Manual, KAERI/TR-1455 /2000, 2000
- [2] Perrin, R. C., J. C. Duthie, "The core restraint modeling program CRAMP part 1 : General Description and User Manual," NRL-r-2030(S) part 1, UKAEA, 1989
- [3] Urban, K., "Analysis of Bowed Reactor Cores Using the FIAT Program," 4th

SMIRT conference, San Francisco, USA, 1977.

- [4] B.K.Cha, G.A, McLennan and P.J.Fulford, NUBOW-2D Inelastic : A FORTRAN Program for Static Two-dimensional Structural Analysis of Bowed Reactor Cores, Including Effects of Irradiation Creep and Swelling, ANL-CT-77-34, June 1977
- [5] 이병운 외 2인, “집합체덕트의 변형에 기인한 칼리머 노심의 기계적 거동 분석” ‘99 한국원자력학회 추계발표회논문집, 1999