2000추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

집합체 덕트 dilation 해석 모델 개선 및 거동 분석

Modeling and Behavior Analysis on the Dilation of the Assembly Duct

이병운, 황완, 김경군, 김영일

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

Dilation은 집합체부품의 반경방향 팽창을 의미하며, 본 논문에서의 dilation은 덕트 내부의 냉각재 압력에 의한 변형을 포함한다. Dilation은 특히 집합체덕트의 노심축방향 중앙위치에서 가장 크게 일어나며, 만약 집합체덕트간의 간격보다 크게 일어난다면 집합체덕트간 접촉이 일어나 노심 외부로 집합체덕트를 밀어내게 하는 효과를 가져온다. 본 논문의 목적은 NUBOW2D-KMOD 코드내의 집합체 덕트 dilation 모델을 개선하는 것이다. 현재 보유하고 있는 NUBOW2D-KMOD는 stainless steel에 대한 실험치를 이용하고 있으므로, 덕트 재료가 HT9인 KALIMER에는 실제로 적용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 해석적인 방법으로 dilation 을 계산할 수 있도록 dilation모델을 개선하여 KALIMER에 적용할 수 있도록 하였으며, 해석적인 모델에 의한 결과는 FIAT에서 사용되고 있는 경험식과 CRAMP 해석에 의한 결과와 비교하였다.

Abstract

Dilation is defined as the uniform radial growth of the assembly duct component, and the distortion of the assembly duct by internal coolant pressure is also included in this paper. Maximum dilation especially occurs at the mid-core plane of the assembly duct. If the consequence of duct dilation is greater than the gap between neighboring assembly ducts, the contacts between assembly ducts will occur, and would push assembly ducts outward radially. The objective of this paper is to update the dilation model for assembly duct in the NUBOW2D-KMOD code. The experimental equation for the stainless steel was included in the dilation model of NUBOW2D-KMOD code. But because the material of assembly duct for KALIMER is HT9, it is not proper to use the old dilation model. This paper upgrade the dilation model into analytical model, so it is possible to apply the dilation model to KALIMER. The analytical results of this model are compared with those of FIAT and CRAMP.

1. 개요

Dilation은 집합체부품의 반경방향 팽창을 의미하며, 본 논문에서의 dilation은 덕트 내부의 냉각재 압력에 의한 변형을 포함한다[1].

Dilation은 특히 노심축방향 중간부에서 가장 크게 일어나며, 만약 집합체덕트간의 간격보다 크게 일어난다면 집합체덕트간 접촉이 일어나 노심 외부로 집합체덕트를 밀어내게 하는 효과를 가져온다. 그렇게 될 경우 제어봉 집합체의 삽입이 불가능해지거나, 핵연료재장전이 불가능해질 수 있다. 이러한 현상을 막기위해서는 집합체덕트 두께가 두꺼워져야 하지만 이 경우 노심의 크기가 일정하다면, 그만큼 장전되는 핵연료의 양이 적어지게 되어 증식비를 떨어뜨리게 되는 효과를 가져온다. 따라서 dilation 해석을 통하여 dilation이 어느정도 일어날 수 있는 지를 예측하는 것과 또한 집합체덕트 설계시 어느 정도의 설계 여유도를 주어야 하는 지를 정확히 예측하는 것이 중요하다.

본 논문의 목적은 NUBOW2D-KMOD 코드내의 집합체 덕트 dilation 모델을 개선하는 것이다. 현재 보유하고 있는 NUBOW2D-KMOD는 stainless steel에 대한 실험치를 이용하고 있으므로, 덕트 재료가 다른 KALIMER에는 실제로 적용할 수 없다. 따라서 이를 해석적인 모델로 개선하여 KALIMER에 적용할 수 있도록 하였다.

해석적인 모델을 사용할 시에는, 냉각재 압력에 의한 부피 변화 및 열적 creep이 약간 과도하게 계산될 수 있으나, 이는 무시할 수 있는 수준이므로, 본 논문에서는 HEDL[2]에서 사용한 것과 같은 해석적인 방법을 사용한다. 해석적인 모델에 의한 결과는 FIAT[3]에서 사용되고 있는 경험식과 CRAMP[4]해석에 의한 결과와 비교하였다.

2. 모델링

본 모델은 간단한 보 이론을 이용하며, 재료데이터는 기존의 NUBOW2D-KMOD에서 사용되고 있는 값을 이용한다.

Dilation이 고려되는, 단위길이당 하중압력 P를 받고 있는 길이 dx인 그림 1과 같은 노심 중앙의 덕트 벽면이 있다고 가정한다.

이때의 평형 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-V-F_{cont}dx+Pdx+(V+dV)=0. \quad (1)$$

여기서, V=shear force, F_{cont}=contact force, P=uniform loading=coolant pressure difference, F_a=axial force.

방정식 (1)은 다음과 같이 간단히 표시된다.

$$P-F_{cont}=dV/dx. \quad (2)$$

F_{cont}는 NUBOW2D-KMOD 프로그램 내에서 계산된 값으로 입력된다.

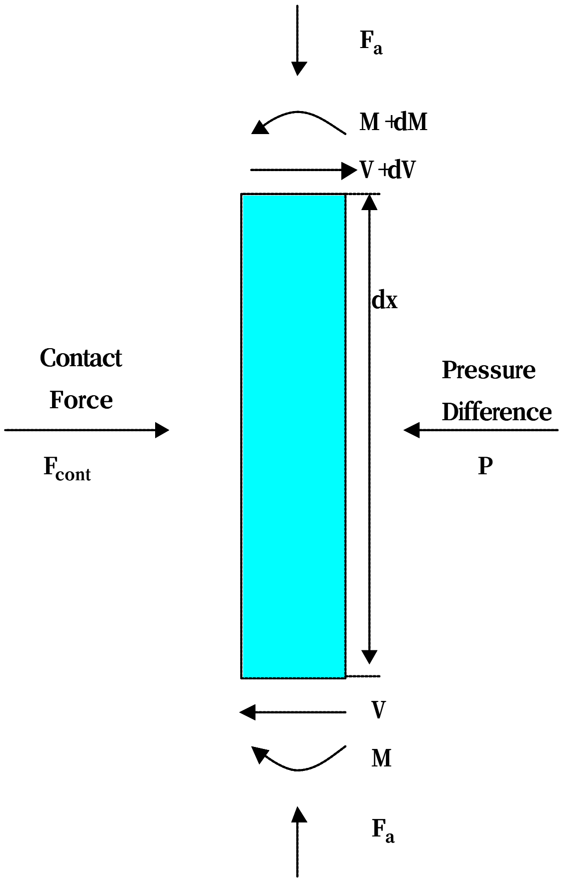

그림 1. 덕트 벽면 모델

또한 모멘트 평형방정식은 shear force 방정식을 적분한 후, 보에 가해지는 축방향힘에 의한 모멘트를 고려하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다[5].

$$M(x) = \int V(x)dx - F_a d(x)\,. \tag{3}$$

여기서, M=moment, V=shear force, F_a=axial force, δ=deflection.

또한 축방향 힘 F_a는 Euler's Theory[6]에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_a = \frac{p^2 EI}{4L^2}\,. \tag{4}$$

여기서, L=width, E=young's modulus, I=momentum inertia.

적합방정식은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x}\,. \tag{5}$$

그러나 위 식은 간단한 보이론에 의해 방정식 (6)과 같이 나타낸다.

$$e_x = \frac{s_x}{E} = \frac{y}{r} = -y\frac{d^2 v}{dx^2}\,. \tag{6}$$

여기서, ρ = radius of curvature.

힘과 변형율의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$e_x = \frac{s_x}{E} + a\Delta T + e^s + e_x^c . \tag{7}$$

보이론을 쉽게 이용하기 위하여 방정식 (7)을 방정식(6)에 대입하여, y를 양변에 곱해주고, 면적에 대해 적분을 하여 관성모멘트를 이용할 수 있는 방정식으로 변환시키면 방정식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\int -y^2 \frac{d^2 v}{dx^2} dA = \int \frac{s_x}{E} y dA + \int y a \Delta T dA + \int y(e^s + e_x^c) dA . \tag{8}$$

보이론에 의해, 그리고 관성모멘트에 의해 다음과 같은 상관식을 얻을 수 있다.

$$\int y^2 dA = I \tag{9-1}$$

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI} \tag{9-2}$$

$$s_x = \frac{y}{r} E = \frac{M}{EI} yE = M \frac{y}{I} . \tag{9-3}$$

방정식 (9)를 이용하면 방정식 (8)의 우변의 첫번째 항은 다음과 같다.

$$\int \frac{s_x}{E} y dA = \int \frac{y}{E} \frac{My}{I} dA = \frac{M}{EI} \int y^2 dA = \frac{M}{E} . \tag{10}$$

방정식 (8)의 우변의 두번째 항은, thermal moment를

$M_t = \dfrac{a\Delta T \cdot EI}{D}$ 로 나타낼 수 있으므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a\Delta T = \frac{D \cdot M_t}{EI} . \tag{11}$$

여기서, D=덕트 직경.

우변의 세번째 항중, swelling에 의한 dilation은 덕트재료인 HT9의 특성상 일어나지 않는다고 고려할 수 있으므로[7], creep에 의한 dilation만 고려한다.

Creep에 의한 dilation은 creep modulus에 의해, 그리고 보이론에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e}_c = \frac{de}{dt} = K s^n \tag{12-1}$$

$$e_c = \int \dot{e}_c dt \cong \sum K_i s_i^n \tag{12-2}$$

$$s_i = \frac{M_i y}{I} . \tag{12-3}$$

이를 이용하면 우변의 세번째 항은 다음과 같다.

$$\int (e_c + e_s) ydA = \int \sum (K_i s_i) ydA = \int \sum K_i \frac{M_i y}{I} ydA = \sum K_i M_i \ . \tag{13}$$

따라서 방정식 (8)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$-I\frac{d^2 d}{dx^2} = \frac{M}{E} + \frac{D \cdot M_t}{EI} + \sum K_i M_i \ . \tag{14}$$

방정식 (14)의 우변에서 Bending moment들은 일정한 내부 압력의 힘이 작용할 경우에는 시간에 따라 일정하다고 가정하여, 방정식 (14)를 모멘트에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$M = \frac{-I\dfrac{d^2 d}{dx^2}}{(\dfrac{1}{E} + \dfrac{D}{EI} + \sum K_i)} . \tag{15}$$

방정식 (15)를 shear force에 대한 방정식 (3)에 대입하여 shear force에 대해 풀면, 다음과 같이 표현된다.

$$V(x) = \frac{-I}{\dfrac{1}{E} + \dfrac{D}{EI} + \sum K_i} \frac{d^3 d}{dx^3} - [F_a]\frac{dd}{dx} . \tag{16}$$

방정식 (16)과 방정식 (1)로부터, 변위에 대한 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$P - F_{cont} = \frac{-I}{\dfrac{1}{E} + \dfrac{D}{EI} + \sum K_i} \frac{d^4 d}{dx^4} - [F_a]\frac{d^2 d}{dx^2} . \tag{17}$$

방정식 (17)을 변위에 대해서 풀면, 다음과 같은 해를 얻을 수 있다.

$$d(x) = C_1 x + C_2 + C_3 e^{l_1 x} + C_4 e^{l_2 x} - \frac{(P - F_{cont})}{2[F_a]} x^2 . \tag{18}$$

여기서,

$$l_1 = \sqrt{\frac{-[F_a + a\Delta TEI]}{I} (\frac{1}{E} + \frac{D}{EI} + \sum K_i)}$$

$$l_2 = -l_1 .$$

3. 경계조건

덕트 벽면에 대한 좌표 관계는 그림 2와 같다.

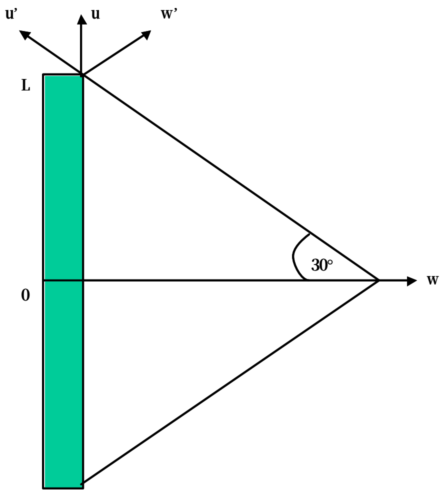

그림 2. 덕트벽면 좌표

이에따른 경계조건은 다음 4가지로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dd(0)}{dx} = 0. \tag{19}$$

$$\frac{dd(L)}{dx} = 0. \tag{20}$$

V(0)=0 . (21)

cos30° U(L) + sin 30°W(L)=0. (22)

여기서, U는 덕트 벽면방향으로의 변위를 나타낸다. 따라서 U=ε·x (여기서 ε는 덕트 벽면에서의 총변형률, x는 덕트 벽면 길이를 나타냄)가 되므로 U는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$U(x) = \left[\frac{s}{E} + a\Delta T + e^{c}\right] \cdot x. \tag{23}$$

방정식 (19)와 방정식 (20)은 보의 양 끝에서는 slope=0임을 나타낸다.

방정식 (21)은 덕트 중앙에서는 shear force=0임을 나타낸다.

방정식 (22)는 z'방향으로의 변위가 없음을 나타낸다.

방정식 (18)에 경계조건을 대입한 후, c에 관한 함수로 정열하면, c에 관한 계수는 다음과 같은 행렬식으로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}. \tag{24}$$

따라서 행렬 (24)에 의해 c값을 구한후, 방정식 (18)에서 변위를 구하면, 덕트 dilation을 구할 수 있다.

4. Creep 방정식

위의 방정식을 풀기위해서는 덕트 재료인 HT9에 대한 크리프 방정식이 필요하다.

HT9에 대한 크리프 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \&_{cr} = & \left[-2.9 + 9.5\times10^{-3}\times(T-273)\right]\times10^{-26} f s^{1.3} \\ & + 1.743\times10^{18}\left(s/E(T)\right)^{2.3}\exp(-36739/T) \end{aligned} . \qquad (25)$$

여기서, $\&_{cr}$, f, s, T, and $E(T)$ are effective strain rate(%s^{-1}), fast neutron flux(n·$cm^{-2}s^{-1}$), effective stress(MPa), temperature(°K), and Elastic Modulus(MPa).

그러나 방정식 (12-1)에서 보는 바와 같이, 응력에 대한 1차 방정식으로 나타내면, K값을 쉽게 이용할 수 있으므로 다음과 같은 식을 이용한다[7].

$$? = 0.25\times[4.01823\times10^{-6}\,T + (-1.2266\times10^{-3})]\,\sigma. \qquad (26)$$

여기서, ? : effective strain rate, (% per dpa)

T : temperature in °C

σ : effective stress in Mpa.

5. 해석 결과 및 검토

해석 모델링의 검증을 위하여 2차원 코드인 FIAT와 3차원 코드인 CRAMP와의 결과 비교를 그림 3에 나타내었다.

FIAT에서는 다음과 같은 경험식을 이용한다.

$$F = \frac{3}{128}\cdot\frac{P\cdot(2L)^4}{h^3}\cdot\frac{e}{s}\ (m).$$

여기서, P는 냉각재 압력, L은 덕트 벽 길이, h는 덕트벽두께이다.

CRAMP는 source file을 공개하지 않아 어떠한 방정식을 사용하는 지는 알 수 없지만, 3차원 코드이며 유럽형고속로에 사용되므로 그 값이 가장 정확하다고 볼 수 있다.

그림 3에서 보는 바와 같이, 세가지 경우 모두 유사한 경향을 보이지만, 절대값에서 CRAMP에서 보다는 작다는 것을 알 수 있다. 즉 본 문서의 해석결과는 최대 dilation이 540일 경과시 약 0.2mm, FIAT는 약 0.15mm, CRAMP는 약 0.24mm를 나타내고 있다.

이것은 2차원 코드가 가지고 있는 제한 요건으로서, 육면으로의 dilation을 고려하지 못하고 반경방향으로만 고려하는 이유로 작게 나온다고 볼 수 있다. 따라서 앞으로 3차원 코드로의 개발과 함께 dilation 해석을 위한 개선이 필요하다고 볼 수 있다. 그렇지만 2차원 코드에서는 현재 개발된 해석 모델이 타당하다는 것을 알 수 있다.

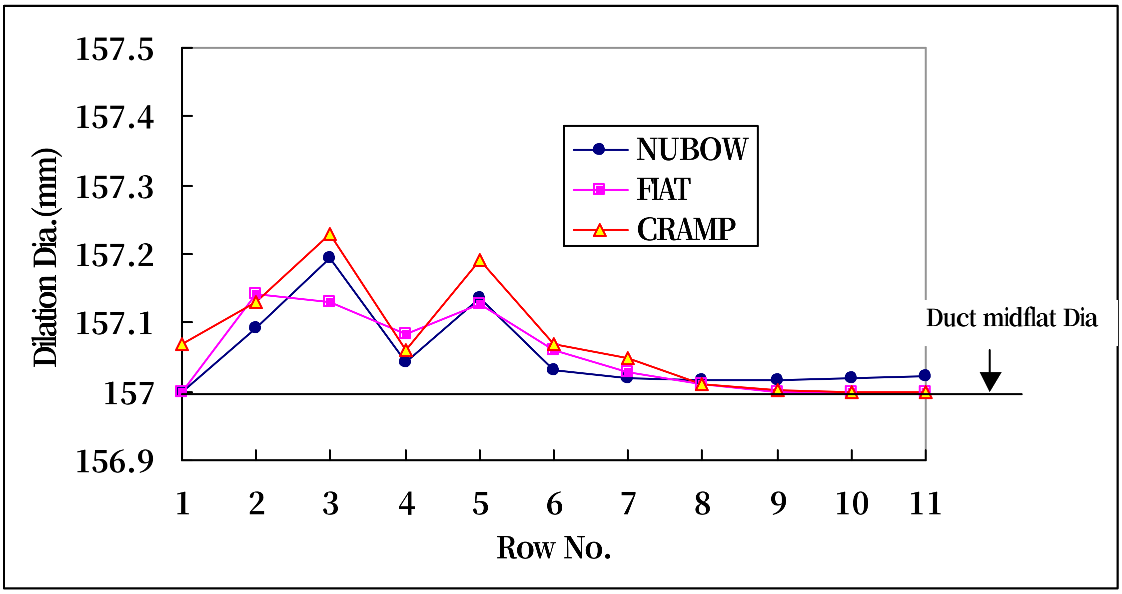

그림 3. 540일 경과시 타 코드와의 dilation 해석 결과 비교

그림 4는 dilation이 고려되는 노심중앙에서의 3번째 row에 대한 덕트 dilation모양을 나타낸다. 덕트 벽면길이가 0인 경우가 덕트벽면 중앙이며, 그림에서 보는 바와 같이 덕트 벽면 중앙에서 가장 dilation이 심하게 일어난다.

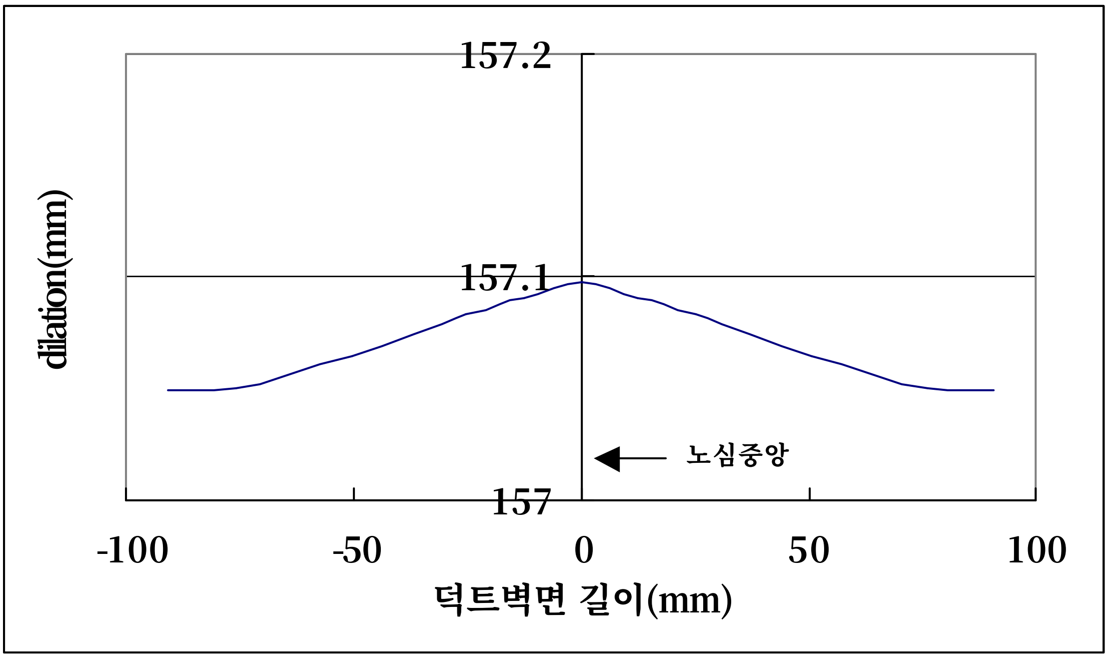

그림 4. 3번째 row에서 덕트벽면 길이에 따른 dilation 모양

그림 5는 그림 4와 같은 노심축방향 중앙위치에서의 dilation모양을 고려했을 시, 노심 전체의 dilation에 의한 모양을 나타낸다. 그림 5에서 보는 바와 같이, row 2, 3, 및 5번의 dilation이 노심 전체의 모양에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

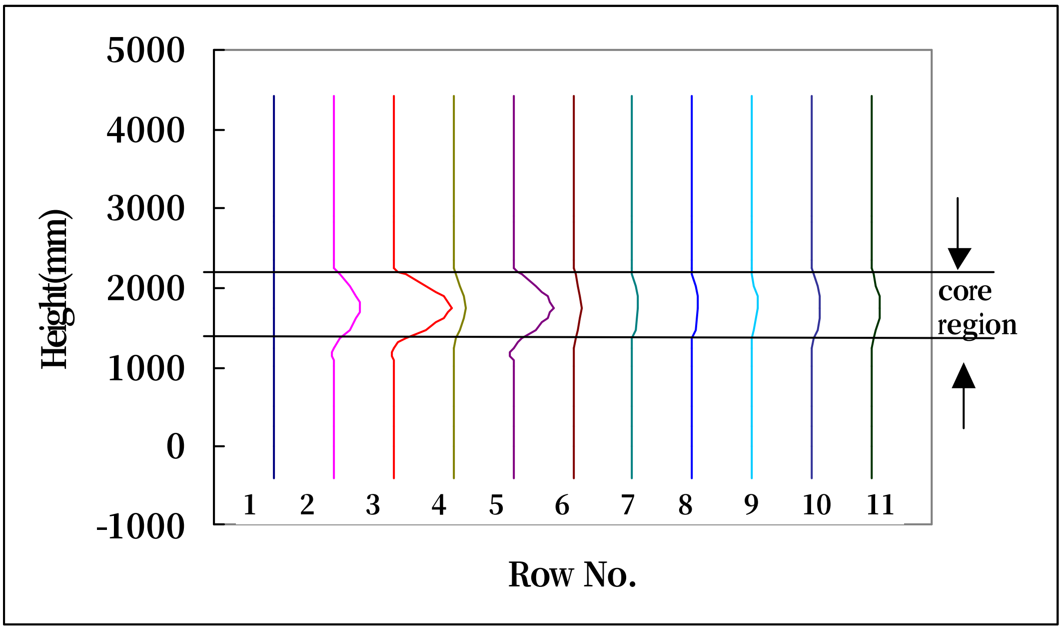

그림 5. 540일 경과시 노심전체의 dilation 모양

또한 현재 덕트간 간격이 4mm이다. 따라서 만약 인접해 있는 덕트 dilation이 합해서 4mm를 넘는다면 덕트의 휨에 의한 영향이 없이도 접촉이 일어나게 되므로, 이를 고려한 전체적인 덕트 재설계가 필요하다. 그러나 현재까지의 해석결과, 덕트 휨에 의한 영향없이는 dilation만에 의한 접촉은 일어나지 않을 것으로 판단된다.

6.0 결론

본 논문은 집합체덕트의 dilation 거동을 모델링하여 NUBOW2D-KMOD내에 설치하고, dilation 거동을 분석하여, 집합체덕트의 건전성 및 제어봉 삽입여유도를 확보하기 위한 목적으로 수행되었다.

현재 보유하고 있는 NUBOW2D-KMOD는 stainless steel에 대한 실험치를 이용하고 있으므로, 덕트 재료가 HT-9인 KALIMER에는 실제로 적용할 수 없다. 따라서 기존의 실험데이터에 의한 프로그램이 아닌 해석적인 방법으로 dilation을 모델링하고 분석하였다.

또한 해석 모델링의 검증을 위하여 2차원 코드인 FIAT와 3차원 코드인 CRAMP와의 결과

를 비교하였다.

Dilation 해석비교 결과, 세가지 경우 모두 유사한 경향을 보이며, 최대 dilation이 540일 경과시 약 0.2mm, FIAT는 약 0.15mm, CRAMP는 약 0.24mm를 나타내고 있다.

또한 현재 덕트간 간격이 4mm이므로, 만약 인접해 있는 덕트의 dilation이 합해서 4mm를 넘게되어 덕트의 휨에 의한 영향이 없이도 접촉이 일어나게 된다면, 이를 고려한 전체적인 덕트 재설계가 필요하다. 그러나 현재까지의 해석결과, 덕트 휨에 의한 영향없이는 dilation 만에 의한 접촉은 일어나지 않는 것으로 나타났다.

따라서 dilation 거동에 의한 영향은 현재 개념설계된 집합체덕트의 제원 및 집합체덕트 재료에 의해 충분한 설계여유도를 가지고 집합체덕트의 건전성 및 제어봉삽입 여유도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) IWGFR, "Verification and Validation of LMFBR Static Core mechanics Codes", IWGFR/75, IAEA, 1986-1989

(2) D.P. Chan, R.J. Jackson, " An analytical study of the dilation of fast reactor fuel assembly ducts" 4th SMIRT conference San Francisco 1977

(3) K.Urban, Analysis of Bowed Reactor Cores Using the FIAT Program, 4th SMIRT conference San Francisco 1977.

(4) R.C. Perrin, J.C.Duthie, The core restraint modeling program – CRAMP part 1 : general description and user manual, NRL-r-2030(S) part 1, UKAEA, August 1989

(5) A.E.Dubberley et.al. "LMFBR Fuel assembly channel wall cross section optimization" 4th SMIRT conference San Francisco 1977

(6) P.P.Benham, "Mechanics of Solids and Structures", PITMAN, 1973

(7) 이병운 외 3인, KALIMER 집합체덕트의 휨 분석, 98한국원자력학회 추계발표회논문집, 1998