

## 원자로냉각재 배관 노즐의 2차원 축대칭 유한요소 모델 결정

최성남\* · 김형남\* · 장기상\* · 김호중\*

## Determination of Two Dimensional Axisymmetric Finite Element Model for Reactor Coolant Piping Nozzles

S.N. Choi, H.N. Kim, K.S. Jang and H.J. Kim

**Key words:** Axisymmetric Model(축대칭 모델), Reactor Coolant Piping(원자로냉각재배관), Finite Element Method(유한요소법), Stress Analysis(응력해석)

## Abstract

The purpose of this paper is to determine a two dimensional axisymmetric model through a comparative study between a three dimensional and an axisymmetric finite element analysis of the reactor coolant piping nozzle subject to internal pressure. The finite element analysis results show that the stress adopting the axisymmetric model with the radius of equivalent spherical vessel are well agree with that adopting the three dimensional model. The the radii of equivalent spherical vessel are 3.5 times and 7.3 times of the radius of the reactor coolant piping for the safety injection nozzle and for the residual heat removal nozzle, respectively.

## 1. 서론

원자력 발전소의 기기나 배관 등의 건전성에 영향을 미칠 수 있는 결함 유무를 확인하기 위하여 가동중점검(In-Service Inspection)을 주기적으로 수행하도록 규정되어 있다. 만약, 발견된 결함이 ASME Sec. XI의 허용결함 크기를 초과할 경우, 정비 없이 기기나 배관을 계속 사용하기 위해서 파괴역학분석을 수행하여 건전성 여부를 확인해야 한다. 파괴역학분석에 있어서 결함형상과 응력데이터는 필수적인 자료이다. 본 논문에서는 원전사업자는 원전 주요 기기의 용접부위별로 운전조건에

따른 응력해석을 수행하고 이를 데이터베이스화하여 결함평가에 사용하고 있으며, 파괴역학분석시 사용되는 응력데이터는 기기 또는 배관의 벽두께에 따른 응력 값으로 표시되어야 보다 실제적인 해석이 가능하다.

기기 또는 배관의 노즐부는 그 형상에 복잡하여 이론적인 해가 존재하지 않으므로 유한요소해석과 같은 수치적 방법으로 응력해석을 해야한다. 3차원 응력해석은 2차원 응력해석에 비하여 상당한 시간과 프로그램 응용이 필요하다. 그러므로 3차원 유한요소모델을 대치할 수 있는 신뢰성 있는 2차원 유한요소모델의 결정은 매우 가치 있는 일이라 할 수 있다. 따라서, 원자력발전소 1차계통 냉각재 배관(Reactor Coolant Piping) 안전주입노즐(Safety Injection Nozzle)과 잔열제거노즐(Residual Heat

\* 한국전력공사 전력연구원

Removal Nozzle)에 응력해석 시간과 노력을 줄일 수 있는 2차원 모델을 결정하였다. 즉, 3차원 응력해석 결과와 근사한 응력분포를 갖는 2차원 축대칭 모델을 결정하였다.

## 2. 3차원 유한요소 해석

### 2-1 안전주입노즐 유한요소 해석

3차원 유한요소 해석을 수행하기 위해 범용 유한요소해석 코드인 ANSYS Version 5.6.1<sup>[1]</sup>을 사용하였다. 원자로냉각재 안전주입노즐의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다. 원자로냉각재 배관 재료는 SA-182 F316N이고, 노즐의 재료는 SA-351 CF8A이다. 각각의 재료 물성치는 ASME Code에서 인용하였으며, 그 값은 Table 1과 같다.

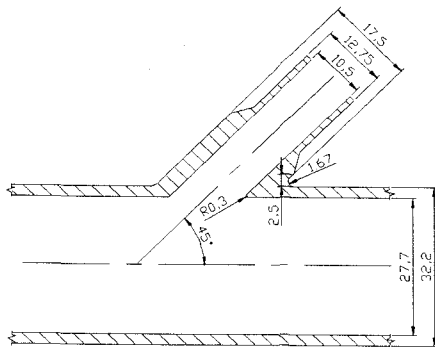


Fig. 1 Geometry of safety injection nozzle (inches)

Table 1 Material properties of piping and nozzle

Material (70°F)	Young's modulus (psi)	Poisson's ratio	Density (lb/in <sup>3</sup> )
SA-182 F316N	$0.283 \times 10^6$	0.3	0.283
SA-351 CF8A	$0.283 \times 10^6$	0.3	0.283

원자로냉각재 안전주입노즐의 대칭성을 고려하여 Fig. 2와 같이 2분면 대칭으로 모델링 하였으며, 7,311개의 10절점(node)과 Tetra 요소(element)를 사

용하였다. 유한요소모델 경계에 의한 노즐부의 응력 영향이 최소화되도록 식(1)을 이용하여 각 배관 길이를 연장하여 모델링 하였다.

$$L \geq 2.5\sqrt{RT} \quad (1)$$

여기서,  $L$  = 연장길이(in)

$R$  = 평균반경(in)

$T$  = 배관두께(in)

이다.

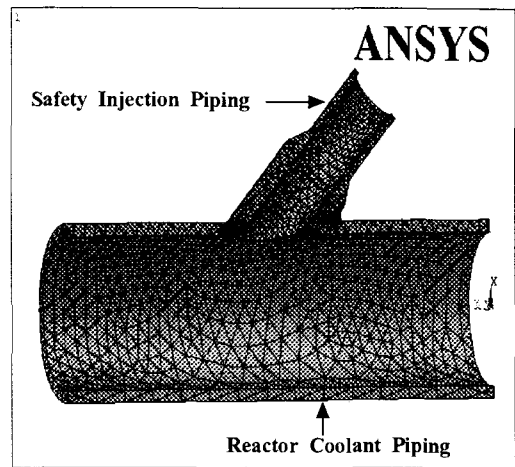


Fig. 2 3-D finite element model of safety injection nozzle

3차원 유한요소모델에 1000 psi의 내부압력을 주었으며, 내부압력에 의한 배관 및 노즐의 축방향 응력( $\sigma_{axial}$ )은 식(2)와 (3)을 이용하여 각각 적용하였다<sup>[2]</sup>.

$$\sigma_{axial} = PR^2 / (R_2^2 - R_1^2) \quad (2)$$

$$\sigma_{axial} = Pr^2 / (r_2^2 - r_1^2) \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_{axial}$  = 축방향 응력(psi)

$P$  = 내부압력(1000 psi)

$R_1, R_2$  = 냉각재배관 내반경, 외반경(in)

$r_1, r_2$  = 노즐부배관 내반경, 외반경(in)

$R$  = 주배관 평균반경(in)

$r$  = 노즐부 배관 평균반경(in)

이다.

응력해석 모델 대칭면은 대칭면에 수직방향 변위를 구속하였다.

응력해석 결과 안전주입노즐 코너부위의 응력강도(Stress Intensity)와 원주방향응력(Hoop Stress)은 Fig. 3과 같이 노즐과 원자로냉각재 배관과의 곡률 반경이 가장 작은 곳에서 최대를 나타내고 있으며, 노즐 코너부위 위치에 따라 응력분포가 변화하고 있음을 알 수 있다.

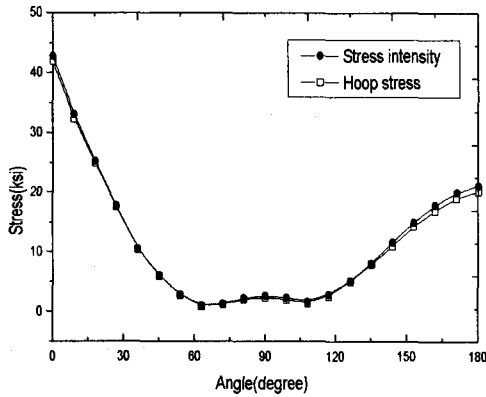


Fig. 3 Stress distribution around the coner of safety injection nozzle

## 2-2 잔열제거노즐 유한요소 해석

잔열제거노즐의 형상 및 치수는 Fig. 4와 같다.

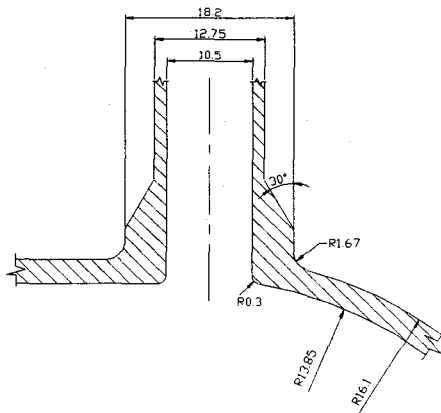


Fig. 4 Geometry of residual heat removal nozzle (inches)

원자로냉각재 배관 재료는 SA-182 F316N이고, 노즐의 재료는 SA-351 CF8A이며, 각각의 재료 물성치는 ASME Code에서 인용하였고, 그 값은 Table 1과 같다. 잔열제거노즐의 대칭성을 고려하여 Fig. 5와 같이 4분면 대칭으로 모델링 하였으며, 9,000개의 10절점(node)과 Tetra 요소(element)를 사용하였다. 유한요소모델 경계에 의한 노즐부 응력 영향이 최소화 되도록 식(1)을 이용하여 각 배관 길이를 연장하여 모델링 하였다.

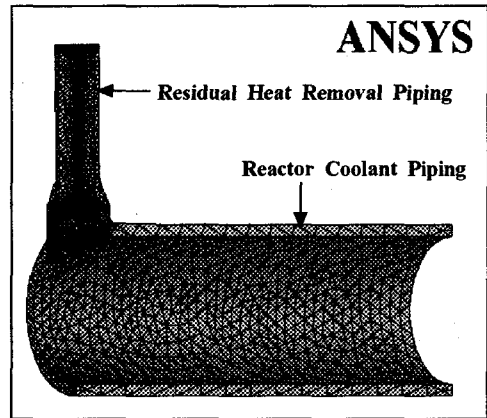


Fig. 5 3-D finite element model of residual heat removal nozzle

3차원 유한요소모델의 하중 및 경계조건은 안전주입노즐과 같이 적용하였다.

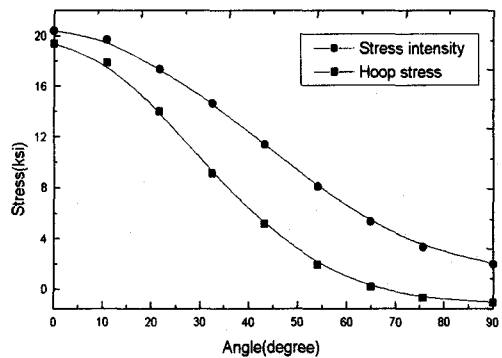


Fig. 6 Stress distribution around the coner of residual heat removal nozzle

응력해석 결과 잔열제거노즐 코너부위의 응력강도(Stress Intensity)와 원주방향응력(Hoop Stress)

ss)은 Fig. 6과 같이 최대응력은 노즐과 원자로냉각재 배관과의 직각인 곳에서 발생하고 있으며, 노즐 코너부위 위치에 따라 응력분포가 변화하고 있음을 알 수 있다.

### 3. 2차원 축대칭 유한요소 해석

3차원 유한요소 해석은 2차원에 비하여 상당한 시간과 프로그램 응용이 필요하다. 원자로냉각재 배관 노즐은 2분면 또는 4분면 대칭 구조물이지만, 과도상태가 많아 응력해석 및 결과처리에 많은 시간과 노력이 필요하다. 따라서, 응력해석시 사용되는 시간과 노력을 최소화하기 위하여 2분면 또는 4분면 대칭인 노즐을 2차원 축대칭 모델로 변환하여 응력해석을 수행하였다. 3차원 형상인 노즐을 2차원으로 변환하는 것은 실린더 대신 노즐코너부위에 동일한 응력을 발생시킬 수 있는 크기의 구형압력용기에 노즐이 부착된 경우를 해석하는 것으로서, 이는 2차원 축대칭 모델로 구성이 가능하다. 원자로 압력용기 노즐의 경우 압력용기 반경의 1.5~2.0배의 2차원 축대칭 모델을 사용하여 응력해석을 수행하고 있다<sup>[3]</sup>. 그러나 압력용기 크기와 노즐의 다양한 형상에 따라 응력분포의 차이가 있으므로 본 연구에서는 원자로냉각재 안전주입노즐과 잔열제거노즐의 3차원 응력해석 결과와 일치하는 최적의 2차원 축대칭 모델을 결정하였다.

#### 3-1 안전주입노즐 2차원 축대칭 모델 해석

안전주입노즐의 2차원 유한요소 해석을 수행하기 위해서 3차원 응력해석에 사용한 Fig. 1의 노즐의 형상, 치수 및 Table 1의 재료물성 값을 사용하여 2차원 축대칭 모델을 구성하였다.

2차원 축대칭 모델에서 원자로냉각재 배관 반경은 실제 배관 반경(13.85 in)의 8배(110.2 in)와 7.3배(101.105 in)를 사용하였으며, 노즐은 배관과 45° 경사를 이루지만 2차원 모델에서는 직각이 되도록 모델링 하였다. Fig. 7은 2차원 축대칭 모델의 형상, 경계조건 및 하중조건을 나타내고 있으며, 2차원 축대칭 모델에 사용된 요소는 축대칭 8절점 Quadratic 요소(PLANE82) 이다.

유한요소모델 경계에 의한 노즐부의 응력 영향이 최소화가 되도록 식(1)을 이용하여 각 배관 길이를 연장하여 모델링 하였다.

2차원 유한요소모델에 1000 psi(P1)의 내부압력을 주었으며, 내부압력에 의한 노즐의 축방향 응력(P2)은 식 (3)을 이용하여 결정하였고, 배관 경계면은 경계면에 수직방향 변위를 구속하였다.

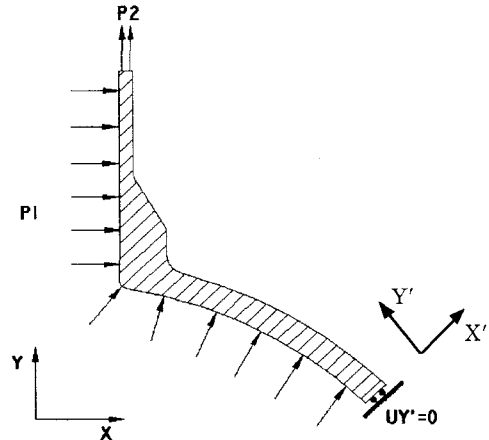


Fig. 7 2-D axisymmetric modeling of nozzle

2차원 응력해석을 수행한 결과 노즐 코너부위에서 최대 응력 값이 나타났다. Fig. 8은 배관 반경의 8배를 사용한 2차원 모델의 원주방향 응력분포이다.

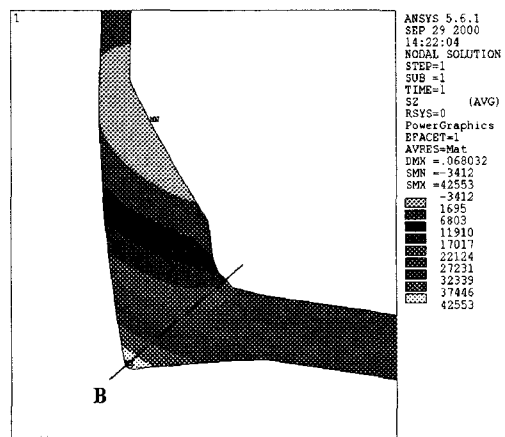


Fig. 8 Hoop stress calculated with 2-D model for safety injection nozzle (7.3R)

### 3-2 잔열제거노즐 2차원 축대칭 모델 해석

잔열제거노즐의 2차원 유한요소 해석을 수행하기 위해서 3차원 응력해석에 사용한 Fig. 3의 노즐의 형상, 치수 및 Table 1의 재료물성 값을 사용하여 2차원 축대칭 모델을 구성하였다.

2차원 축대칭 모델에서 원자로냉각재 배관 반경은 실제 반경(13.85 in)의 3.2배(44.3 in)와 3.5배(48.5 in)를 사용하여 각각 해석하였다.

2차원 유한요소 축대칭 모델의 형상, 경계조건 및 하중조건은 안전주입노즐에 사용한 같은 방법을 사용하여 응력해석을 수행하였다.

응력해석 결과 노즐 코너부위에서 최대 응력이 발생하였으며, Fig. 9는 배관 반경을 3.5배를 사용한 모델의 원주방향 응력분포이다.

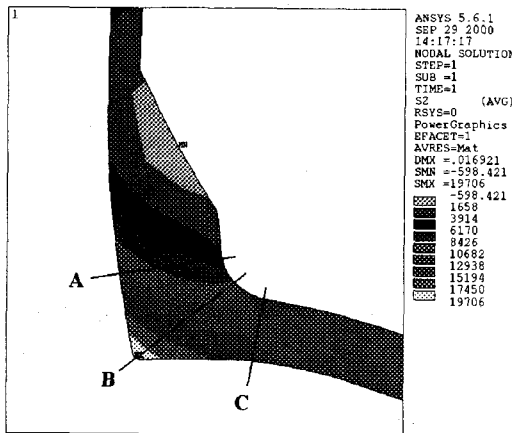


Fig. 9 Hoop stress calculated with 2-D model for residual heat removal nozzle

## 4. 응력해석 결과 검토

3차원 및 2차원 유한요소 해석을 수행한 결과 원주방향응력과 응력강도는 노즐의 코너에서 최대를 나타내고 있으며, 또한 3차원 해석모델과 2차원 해석모델과의 응력분포를 비교하기 위하여 Fig. 9와 같이 3개의 경로를 정의하고 원주방향 응력과 응력강도를 각각 비교하였다.

### 4-1 안전주입노즐 응력해석 결과 검토

안전주입노즐 3차원 응력해석에서 최대 응력은 배관과 45° 경사를 이루는 곳에서 나타났으므로, 최대응력과 같은 응력분포를 갖는 2차원 축대칭 모델은 Table 2과 같이 모델배관 반경을 실제배관 반경에 7.3배를 적용하였을 경우 3차원 모델의 최대응력을 초과하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 10은 2차원과 3차원 모델에 대한 노즐 코너부위의 경로 B에 대한 원주방향응력과 응력강도 비교이다.

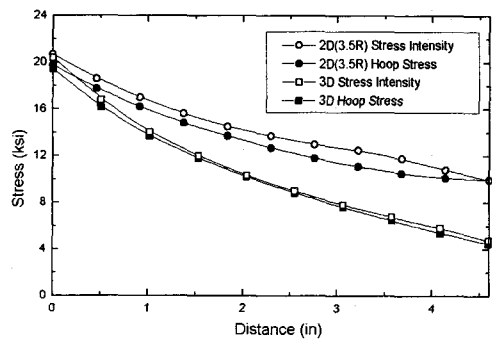


Fig. 10. Stress comparison between 2D and 3D models for safety injection nozzle

Table 2. Comparison of 2-D and 3-D stress analysis results for safety injection nozzle corner

Stress	Path	3D	2D (7.3R)	2D (8.0R)
Hoop (ksi)	B	41.875	42.550	45.771
Intensity (ksi)	B	41.999	43.560	46.605

Section	Path	Stress ratio	
		Hoop	Intensity
2D(7.3R)/3D	B	1.02	1.04
2D(8.0R)/3D		1.09	1.11

### 4-2 잔열제거노즐 응력해석 결과 검토

잔열제거노즐 3차원 응력해석에서 최대 응력은 배관과 90° 경사를 이루는 곳에서 나타났으므로 최대 응력과 같은 응력분포를 갖는 2차원 축대칭

모델은 실제배관 반경에 3.5배를 적용하였을 경우 Table 3와 같이 A, B 및 C경로에 대하여 3차원 모델의 최대 응력을 초과하지 않음을 알 수 있다. Fig. 11은 2차원과 3차원 모델에 대한 노즐 코너부 위의 경로 B에 대한 원주방향응력과 응력강도 비교이다.

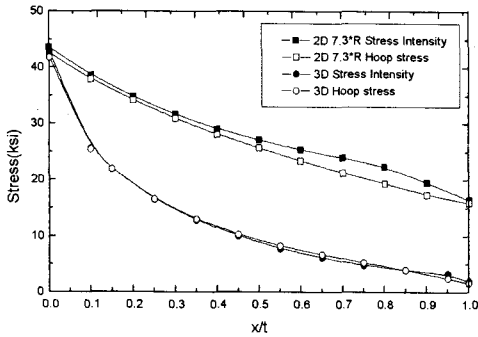


Fig. 11 Stress comparison between 2D and 3D model for residual heat removal nozzle

Table 3. Comparison of 2-D and 3-D stress analysis results for residual heat removal nozzle

Stress	Path	3D	2D(3.2R)	2D(3.5R)
Hoop (ksi)	A	8.805	8.959	9.520
	B	19.415	17.922	19.760
	C	9.404	13.886	14.050
Intensity (ksi)	A	8.747	9.907	10.410
	B	20.263	18.900	20.700
	C	9.025	14.800	15.100

Section	Path	Stress ratio	
		Hoop	Intensity
2D(3.2R)/3D	A	0.977	1.133
	B	0.923	0.933
	C	1.477	1.640
2D(3.5R)/3D	A	1.081	1.190
	B	1.018	1.022
	C	1.494	1.673

## 5. 결론

원자로냉각재 배관 안전주입노즐과 잔열제거노즐의 3차원과 2차원 축대칭 모델을 사용한 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

(1) 배관 노즐부의 응력해석에 있어 2차원 축대

칭모델의 적용은 주배관의 반경에 따라 응력분포의 차이가 있음을 알 수 있다.

(2) 배관 노즐부는 축대칭 모델은 아니지만 주배관 반경을 적절하게 변경한 2차원 축대칭 모델을 적용하여 최대 원주방향응력과 응력강도를 예측할 수 있다.

(3) 원자로냉각재 안전주입노즐의 경우 배관 반경의 3.5배 2차원 축대칭 모델이, 잔열제거노즐의 경우 7.3배의 2차원 축대칭 모델이 적절함을 확인하였다.

(4) 원전 가동중점검시 해석된 노즐부에 결함의 발견되어 파괴역학분석이 필요할 경우, 결정된 2차원 축대칭 모델을 사용함으로써 응력해석에 필요한 시간과 노력을 줄일 수 있다.

## 참고 문헌

- ANSYS version 5.6, Swanson Analysis Systems, Inc.
- KEPRI, "고리 1, 2호기 원자로 압력용기 안전주입노즐 응력해석" 1998, 9
- KEPRI, "가압경수로 1차 계통 주요기기의 파괴역학 평가체제 개발 중간보고서" 1998, 3
- Truit, J. B. and Raju, P. P., "Three-Dimensional Versus Axisymmetric Finite Element Analysis of a Cylindrical Vessel Inlet Nozzle Subject to Internal Pressure - a Comparative Study", Westinghouse Report
- W-SMT-97-076, "2D&3D Finite Element Analysis of the Reactor Vessel Safety Injection Nozzle" 1997. 3
- 최성남, 이인철, 장기상, "원자력 압력용기 안전주입노즐의 2차원 축대칭 모델 유한요소해석", 기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp. 844-849, 1998. 4