

## SMART 냉각재순환펌프 상부 덮개의 열 및 응력 해석 Thermal and Stress Analysis of MCP cover in SMART Main Coolant Pump

임영빈, 박진석, 김종인

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

본 논문에서는 SMART 냉각재순환펌프 상부 덮개의 구조건전성 평가를 위하여 열 및 응력 해석을 수행하였다. 냉각재순환펌프 상부 덮개는 고온 고압의 경계를 형성하는 부분으로 유한요소법을 이용하여 구조적 건전성을 확인하였다. 유한 요소 해석은 3차원 모델과 축대칭 모델을 사용하였다. 경계조건은 열 해석을 위한 대류 조건과 응력 해석을 위한 압력 및 자유도 구속 조건을 적용하였으며 압력 조건은 설계온도에 대한 설계압력 조건과 상온에서의 정수압 시험 압력을 적용하였다. 축대칭 모델에 대하여는 설계온도에서 설계압력만을 적용하였다. 유한요소 해석은 상용 코드인 I-DEAS와 ANSYS를 사용하였다. 해석 결과에 대하여 온도 분포와 열응력, 그리고 압력으로 인한 응력 분포를 제시하였다.

### Abstract

Thermal and stress analyses are performed to evaluate the structural integrity of the MCP cover in SMART. A finite element method is used to perform the thermal and stress analysis of the MCP, using 3D and axisymmetric models. The boundary conditions are applied proper D.O.F, thermal convection condition, design pressure at design temperature and the hydraulic test pressure at room temperature. In case of the axisymmetric model, only the design pressure at design temperature is applied as boundary condition. I-DEAS and ANSYS are used to perform the analyses of the MCP cover. Results of the finite element analysis are temperature distribution, thermal stress, the maximum shear stress, and stress intensity.

### 1. 서론

일체형원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor)는 가압기, 증기발생기, 제어봉구동장치, 그리고 냉각재순환펌프(MCP : Main Coolant Pump) 등과 같은 주기기를 원자로 압력용기 내에 설치하여 대형 배관을 제거할 수 있어 냉각 계통과 지지물 구조가 매우 단순하므로 소형으로 제작 할 수 있다[1,2,3]. 이와 같이 대형 배관이 없기 때문에 냉각 계통의 누수와 같은 대형 사고를 근본적으로 방지할 수 있는 장점이 있다. SMART 냉각재순환펌프는 전동기 부분이 캔으로 밀봉되는 캔드 모터 펌프로 설계되었으며 원자로 운전시 일차 냉각수를 순환시키기 위한 목적으로 그 구성은 냉각수를 순환시키는 임펠러, 회전축에 회전력을 제공하는 농형 유도 전동기, 임펠러에 회전력을 전달

하는 회전축, 회전축을 지지하는 베어링, 유도전동기를 냉각시키기 위한 냉각장치, 회전축의 회전수를 측정하는 감지 센서 장치 등으로 구성되며 그림 1과 그림 2와 같다. 그림 1과 그림2는 I-DEAS를 이용한 냉각재순환펌프의 전체 형상을 나타낸 것으로 기본 설계와 3차원 형상 설계를 병행하여 설계, 제작 및 조립성 검토를 병행할 수 있게 하였다[4].

냉각재순환펌프는 캔드 모터 펌프로 내부에 일차 냉각수를 순환시킬 수 있는 내부 순환 회로를 구성하고 있다. 따라서, 냉각재순환펌프 내부에 고온 고압의 압력경계를 형성할 수 있게 된다. 본 논문에서는 고온 고압의 압력경계를 형성하는 부분으로 냉각재순환펌프 상부 덮개에 대한 열 및 응력 해석을 수행하였다.

냉각재순환펌프 상부 덮개에 대한 열 및 응력 해석은 I-DEAS와 ANSYS를 이용하였으며 구체적인 과정과 결과는 다음 장에 제시하였다.

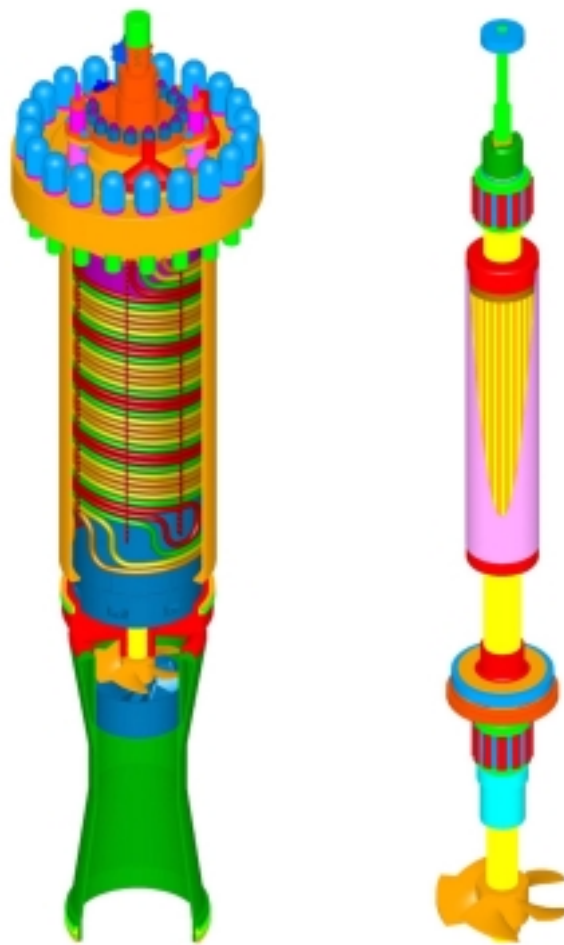


그림 1

그림 2

냉각재순환펌프 형상

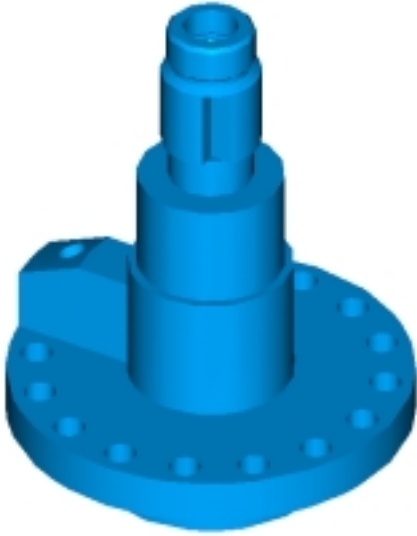


그림 3 MCP 상부 덮개 모델



그림 4 1/4해석 모델

## 2. 본론

### 2.1 유한 요소 모델

그림 1과 그림 2에서는 냉각재순환펌프에 대한 전체적인 형상을 나타낸 것이며 본 논문에서 해석하고자 하는 상부 덮개 형상은 그림 3과 같다. 그림 3에는 스테드와 온도 측정장치, 회전속도 측정장치, 그리고 배기 밸브가 조립된다. 따라서, 해석을 위하여 그림 3의 상부덮개 전체 모델을 그림 4와 같이 1/4모델로 단순화 시켰다. 또한, 해석 결과를 고찰함으로써 1/4모델을 축대칭 모델로 구성할 수 있었다.

그림 4의 모델로 유한요소 해석을 위한 데이터를 생성하였다. 먼저, 격자는 그림 5와 같이 격자를 구성하였다. 그림 5에서 해석에 사용한 절점 수는 19166, 요소 수는 15540이다. 그림 6, 그림 7, 그림 8은 1/4모델의 변위에 대한 구속 경계조건을 표시한 것이다. 그림 6과 그림 7에서는 1/4로 단순화시킨 모델에 대하여 대칭 조건을 적용하였다. 그림 6은 X방향으로 구속시킨 것이고 그림 7은 Z방향의 변위를 구속시킨 것이다. 그림 8은 스테드로 체결되는 부분에 대하여 Y방향으로 구속시킨 것이다.

열응력을 구하기 위하여 먼저 열 해석 수행이 요구되며 경계조건으로 대류 조건을 적용하였으며 그림 9와 같이 내부와 외부 대류조건을 적용하였다. 내부 대류 계수는  $2500 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이고 외부 대류 계수는  $30 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 적용하였다. 또한, 온도조건에 대하여, 내부온도는  $100^\circ\text{C}$ , 외부는  $50^\circ\text{C}$ 를 적용하였다. 그리고, 열 해석으로 얻은 온도 분포를 이용하여 열 응력을 구하기 위하여 그림 6, 그림 7, 그림 8의 변위 구속조건을 이용하였다. 이러한 결과로 열 응력을 구하여 해석결과에 제시하였으며 압력으로 인한 응력과 비교하였다.

그림 10은 압력경계조건에 대한 것이다. 압력경계조건으로는 설계온도  $350^\circ\text{C}$ 에서 설계 압력 17MPa와 상온에서의 정수압 시험 압력 21.5 MPa를 적용하였다. 각 압력조건에 대한 온도조건이 다르다는 것을 알 수 있으며 온도에 대한 물성치 입력 값은 다음 장에 제시하였다.

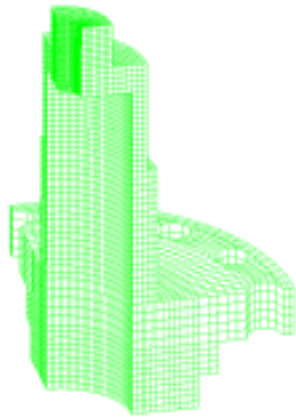


그림 5 해석 모델 격자

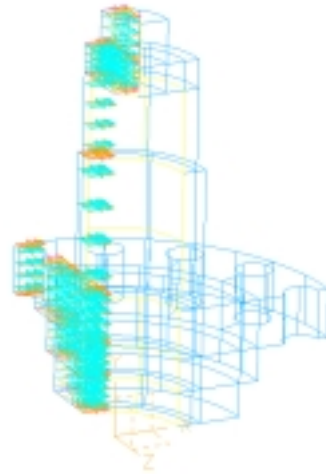


그림 6 경계조건, X방향 구속

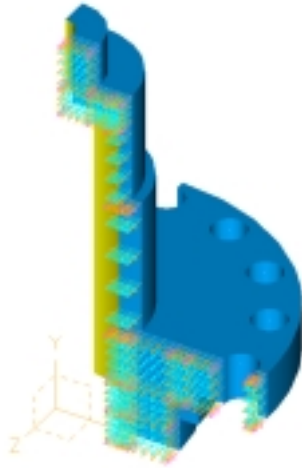


그림 7 경계조건, Z방향 구속

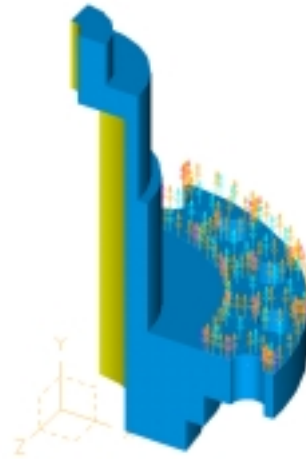


그림 8 경계조건, Y방향 구속

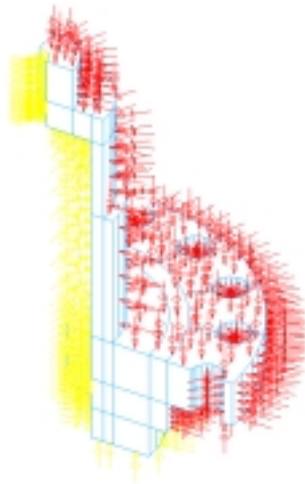


그림 9 대류경계조건

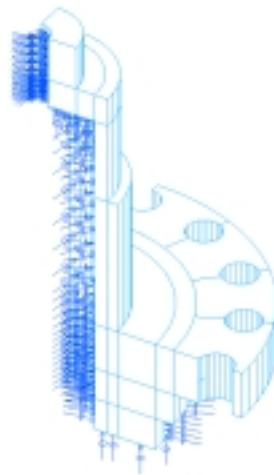


그림 10 압력경계조건

## 2.2 물성치

앞에서는 유한요소해석에 필요한 모델과 경계조건에 대하여 살펴보았다. 본 논문에서 수행한 해석 모델의 재료는 Type 321 Stainless Steel이다. 해석을 위하여 필요한 물성치는 선형 탄성 해석을 위한 탄성계수와 프와송 수(0.29), 그리고 열 해석을 위한 열전도 계수, 열팽창 계수 등이 있다. 위의 재료에 대한 탄성계수, 열전도 계수, 열팽창 계수는 아래와 같다.

표 1 물성치, 열전도 계수, 열팽창 계수, 탄성계수

	열전도 계수	열팽창 계수	탄성계수
°F	Btu/hr-ft- °F	$\times 10^{-6}$ in/in/ °F	$10^6$ psi
70	8.1	-	28.30
100	8.4	9.02	-
150	8.6	9.10	-
200	8.8	9.16	27.60
250	9.1	9.22	-
300	9.4	9.26	27.00
350	9.6	9.30	-
400	9.9	9.34	26.50
450	10.1	9.38	-
500	10.4	9.42	25.80
550	10.6	9.45	-
600	10.9	9.48	25.30
650	11.1	9.52	-
700	11.4	9.55	24.80
750	11.6	9.58	-
800	11.9	9.61	24.10

해석결과와 비교하기 위한 재료의 물성치로는 항복강도와 인장강도 등이 있다. 본 논문에서는 ASME, NB에 규정한 설계응력강도 값을 사용하여 해석 결과 값과 비교하였으며 표 2와 같다.

표 2 18Cr-10Ti-Ni의 설계응력강도

	Min. Yield Strength	Min. Ult. Tensile Strength	Design Stress Intensity						
			100 °F	200 °F	-	600 °F	650 °F	700 °F	750 °F
ksi	30	70/75	20	20	-	16.4	16.1	15.9	15.7
MPa	206.82	482.59/517.06	137.88	137.88	-	113.06	111.68	109.61	108.23

## 2.2 해석 결과

위에서 제시한 해석 모델과 경계조건 및 온도에 대한 물성치를 사용하여 유한요소 해석한 결과를 제시하였다. 응력에 대하여 최대전단응력을 제시하였다. 그림 11은 위의 그림 9의 경계조건으로 얻은 온도분포이다. 그림 12는 그림 11의 결과로 얻은 온도 분포와 그림 6, 그림 7, 그림 8의 구속조건을 이

용하여 얻은 열응력 값이다. 그림 13과 그림 14는 설계온도에 대한 설계압력에 대한 응력 값과 변위를 나타낸 것이다. 그림 15와 그림 16은 열응력과 압력응력의 조합으로 얻은 응력과 변위를 나타낸 것이다. 그림 11의 온도 분포는 모델 상부에서 높은 온도를 가지며 심한 온도 구배는 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 12의 열응력 결과에서 모델의 상부에 대하여 전체적인 응력값이 낮은 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

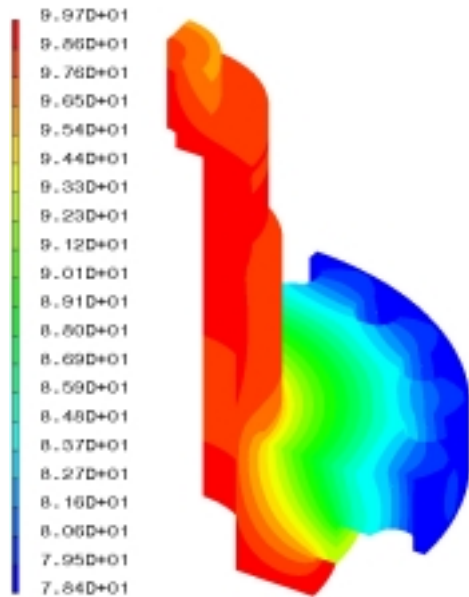


그림 11 온도분포, °C

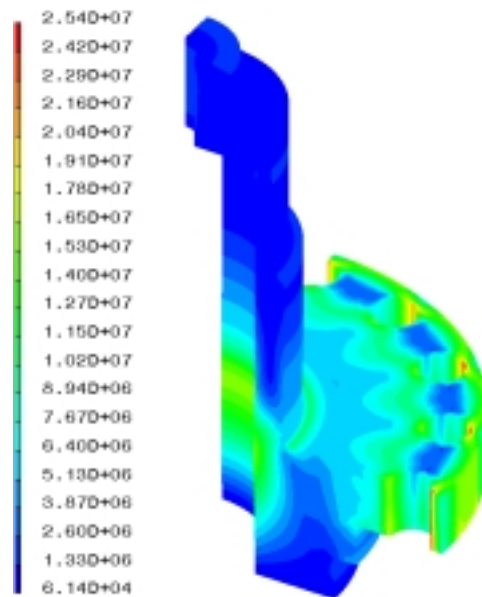


그림 12 열 응력, 최대전단응력, Pa

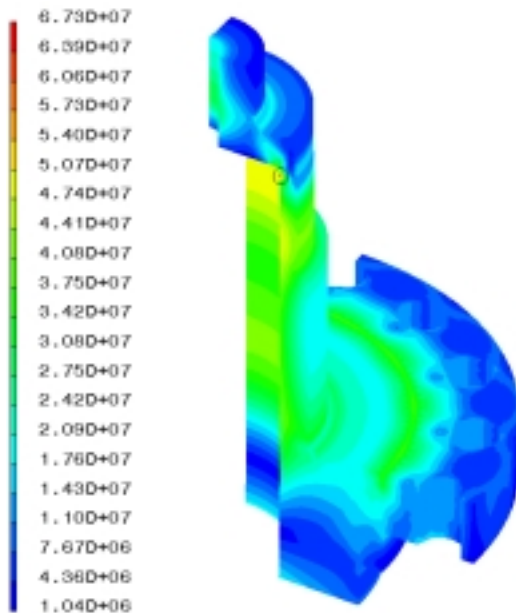


그림 13 설계압력에 대한 최대전단응력, Pa

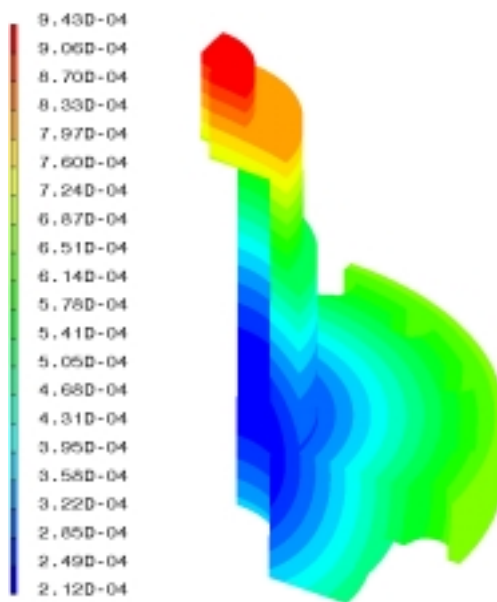


그림 14 설계압력에 대한 변위, m

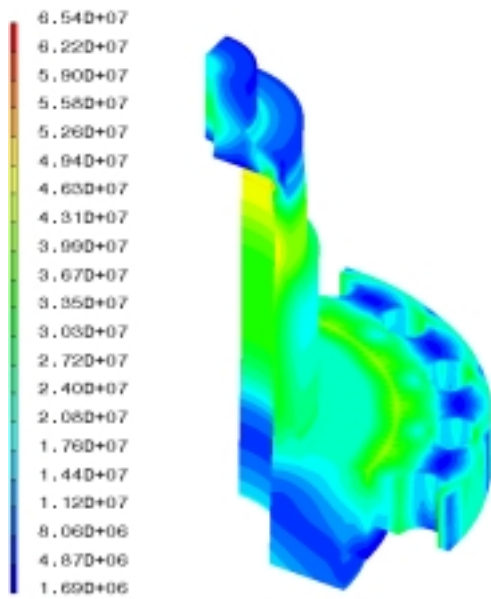


그림 15 열 및 설계압력에 대한 최대전단응력, Pa

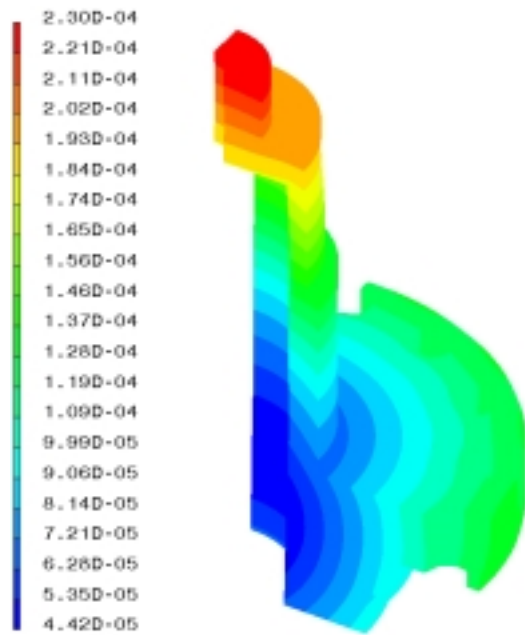


그림 16 열 및 설계압력에 대한 변위, m

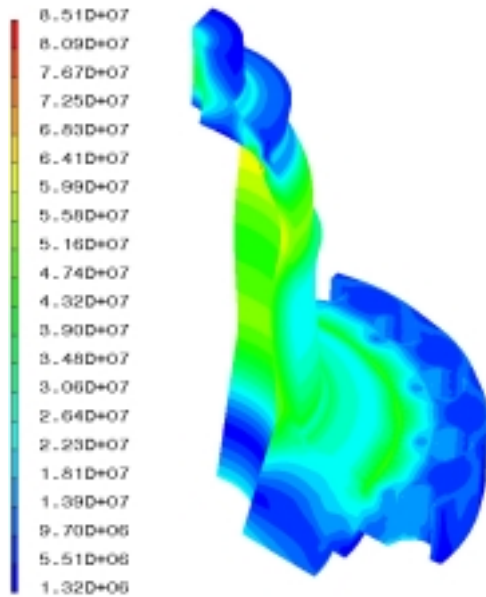


그림 17 정수압 시험압력에 대한 최대전단응력, Pa

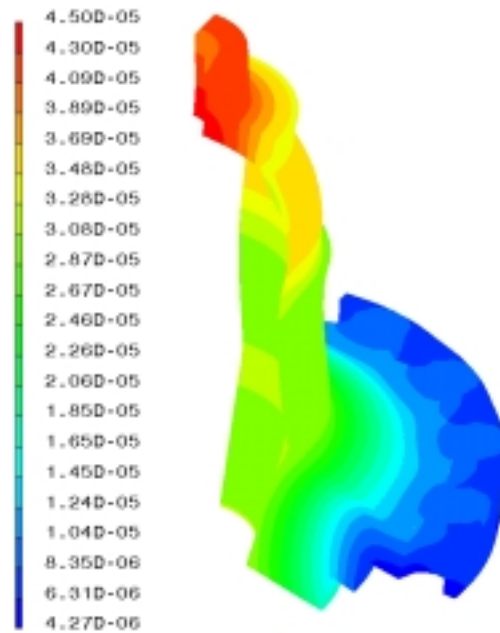


그림 18 정수압 시험압력에 대한 변위, m

그림 13, 그림 14는 설계온도에서 설계압력에 대한 응력과 변위에 대한 결과이다. 그림 13에서는 국부적으로 응력 집중이 크게 발생함을 알 수 있다. 그림 15는 열응력과 설계압력 조건을 조합한 결과이다. 그림 15에 사용된 온도는 열해석으로 얻은 온도조건을 사용하였으며 그 값은 설계온도보다 낮은 값을 가진다. 그림 13과 그림 15의 최대 응력값은 각각 67.3MPa이고 65.4MPa이다. 열응력과 설계압력 조건으로 얻은 응력값이 낮다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 각 해석에 적용된 온도 조건의 영향으로 고찰 할 수 있으며 그림 14와 그림 16에서 변위의 결과로 더 확증할 수 있다. 그림 17과 그림 18은 정수압 시험압력에 대한 응력과 변위에 대한 결과이다. 정수압 시험압력에 대한 온도 조건은 상온이다.

위에서 제시한 해석결과를 통하여 열응력 분포는 전체적으로 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 압력하중에 대한 응력 분포는 각 경우에 있어서 전체적으로 유사함을 알 수 있으며 국부적으로 응력이 집중되는 부분도 동일함을 알 수 있다. 또한, 스테드 구멍에서 발생하는 응력은 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서, 그림 3에서 구조적 불연속부분에 대하여 응력 값이 낮을 것으로 예측할 수 있다. 이러한 이유로 축대칭으로 모델링하여 해석을 수행하였다.

그림 19는 축대칭 해석 모델을 ANSYS를 이용하여 얻은 결과로 응력강도 값이며 경계조건으로는 설계온도에서 설계압력을 적용하였다. 그림 19에서 응력강도(Stress intensity) 값의 최대 값은 101MPa이다. 표2의 설계응력강도 값은 설계온도에서 110MPa의 값을 가진다. 따라서, 해석 결과 값과 비교하였을 때, 안전하다는 것을 알 수 있다.

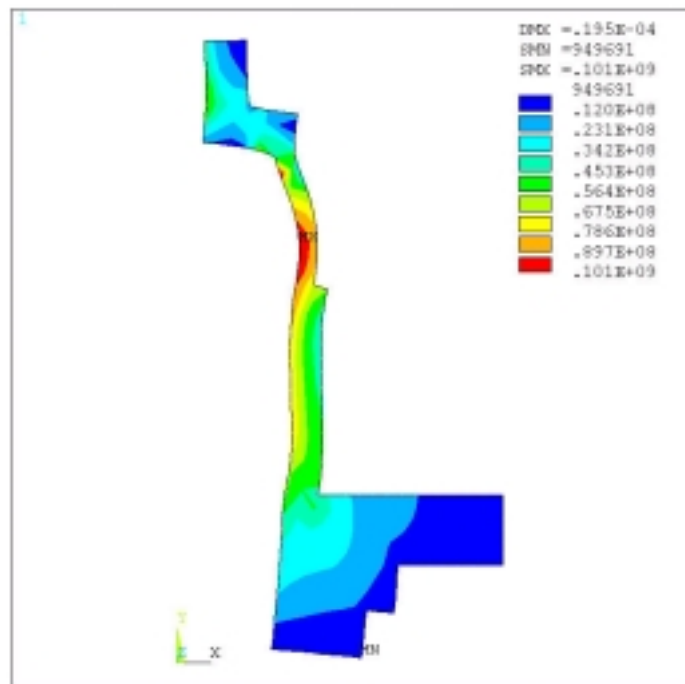


그림 19 축대칭 모델, 응력강도, Pa

### 3. 결론

본 논문에서는 SMART 냉각제순환펌프 상부덮개에 대한 열 및 응력 해석을 수행하였다. 응력 해석으로는 열응력과 설계온도에 대한 설계압력, 그리고 상온에서의 정수압 시험 압력에 대한 응력을 평가하였다. 3차원 해석 결과를 토대로 축대칭 모델을 구성하여 추후 ASME에서 규정하는 구조건전성 평가를 할 수 있는 기초를 만들었다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.



## 참고문헌

- [1] 김종인 외 다수, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험과제 1단계 최종보고서, KAERI/RR-1889/98, 1999.
- [2] 박진석 외 다수, 일체형원자로 SMART 냉각재순환펌프의 개념설계, KAERI/TR-1447/99, 1999.
- [3] 정군석 외 다수, 냉각재순환펌프 제작기술 개발 및 원형제작, KAERI/CM-249/98, 1999.
- [4] *I-DEAS Master series*, Version 8, SDRC Korea.