

SMART 제어봉구동장치의 압력용기에 대한 응력 및 열해석 Stress and Thermal Analyses of Pressure Housing of SMART CEDM

조대희* 유제용** 김지호** 김종인**
Cho, Dae-Hee Yu, Je-Yong Kim, Ji-Ho Kim, Jong-In

ABSTRACT

The structural stability of pressure housing of SMART CEDM forming pressure boundary must be evaluated. In this paper, the stress and thermal analyses of the upper pressure housing of CEDM are performed for design pressure, hydraulic test pressure and thermal loading. Finite element and boundary condition were generated from the model which is made by I-DEAS program and the stress and thermal analyses were performed by ANSYS program. The upper pressure housing was analysed using 2D axisymmetric model because it is symmetry about an axis. The stress values obtained by analysis were compared with the stress intensity limit of ASME and KEPIC MNB standard.

1. 서 론

제어봉구동장치(control element drive mechanism, 이하 CEDM)는 원자로가 정상운전중일 때 제어봉의 삽입량을 조절하고 노심의 핵반응도를 적절히 제어하며, 또한 원자로계통에 사고가 발생하여 긴급한 출력정지가 요구될 때, 제어봉을 신속하게 노심 내부로 삽입시켜 핵분열을 정지시키는 장치이다. 일체형원자로 SMART는 원자로 기동시 핵분열 반응열을 이용하여 냉각재를 가열하며, 무봉산 노심설계의 채택으로 CEDM만으로 반응도 제어가 가능해야 하므로 신뢰성은 물론 미세조정성능이 우수한 CEDM이 필요하다.⁽¹⁾ 제어봉구동장치 형상은 그림 1과 같다. 선형펠스모터형 제어봉구동장치에서 압력경계를 형성하고 있는 압력용기에 대해 구조건전성을 평가해야 하는데 제어봉구동장치 압력용기는 위치지시기가 장착되는 상부압력용기, 선형펠스모터가 장착되는 하부압력용기 두 부분으로 이루어져 있다.

본 논문에서는 ASME Sec. III⁽²⁾ 또는 KEPIC MNB⁽³⁾의 규정에 따라 제어봉 구동장치 상부압력용기에 대한 응력 및 열해석을 수행하였다. 압력용기 내부에 작용하는 설계압력과 수압시험압력을 고려한 경우에 대해 응력 해석을 수행하였고 열해석으로 열하중만 고려한 경우와 열하중과 설계압력이 작용한 경우에 대해 열해석을 수행하였다. 해석 프로그램은 I-DEAS 코드와 ANSYS 코드를 이용하였다. 이 해석에 의한 결과치인 응력강도값들이 ASME 및 KEPIC 기준을 만족하는지 확인하여 구조 건전성을 평가하였다.

* 정회원 · 한라산업

** 한국원자력연구소

2. 설계 기준

설계조건에 대한 응력범주는 1차 응력강도만 고려하며 표 1을 만족해야 한다. 설계압력의 1.25배로 실시하는 수압시험에 대해 응력들을 계산하여 표 2에 주어진 한계값들과 비교해야 한다. 다시 말해서, 시험 온도에서의 1차일반막응력강도(P_m)는 항복강도의 90%를 초과하지 않아야 하며 1차막+굽힘 응력강도($P_m + P_b$)는 표 2와 같이 두가지 경우에 대한 허용한계를 초과해서는 안된다. 여기서, S_y 는 시험온도에서의 항복강도를 나타낸다. 1차 및 2차응력에 대한 응력범주 및 응력강도한계는 표 3에 주어져 있다.

3. 해석

3.1 해석모델 및 경계조건

해석 모델로 제어봉구동장치에서 압력경계를 형성하는 상부압력용기에 대해 수행하였다. 상부압력용기의 재료는 STS 321를 사용한다. 이 재료의 설계응력강도(S_m)는 상온에서 137MPa, 설계온도(350℃)에서 110MPa를 갖는다. 그리고, 최소항복강도(S_y)는 206.82이고 프와송 비는 0.29이다.

상부압력용기는 중심축에 대해 대칭이기 때문에 2차원 축대칭으로 해석할 수 있다. 모델링 및 경계조건은 I-DEAS 코드를 이용하였고 해석은 ANSYS 코드를 사용하였다. 압력하중을 고려한 경우 설계압력으로 17MPa이 작용하게 되고 수압시험압력의 경우 설계압력의 1.25배인 21.25MPa의 압력이 작용한다. 경계조건으로 밑면에 대해 y방향을 구속($U_y = 0$)하였다. 해석 좌표계는 cartesian을 사용하고 유한요소는 2차원 축대칭 쉘요소를 사용한다. 그림 2는 상부압력용기의 유한요소모델과 응력선형화 단면을 나타내고 있다. 응력선형화 구간을 각각 2군데씩 선정하여 값을 구하였다.

3.2 해석결과

상부압력용기에서 압력하중을 고려한 경우에 대해 수행한 해석결과는 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 그림의 단위는 Pa이다. 설계온도(350℃)와 설계압력(17MPa)을 적용한 해석 결과는 그림 3과 같다. 압력용기 중간부에 최대 122MPa의 응력이 걸리고 하부압력용기와 볼트로 체결되는 하단부 용기 바깥쪽에 1.37MPa의 최소응력이 걸린다. 압력용기 내부에 수압시험압력(21.25MPa)이 걸리고 상온의 조건일 때 응력을 구한 것은 그림 4와 같다. 수압시험해석 결과는 설계압력에서 구한 응력강도 분포와 같은 contour를 나타내고 있으며 제일 크게 걸리는 곳에 152MPa의 응력강도를 보이고 있다.

압력용기에서 응력강도가 크게 걸리거나 응력분포가 심한 곳을 선정하여 그림 2와 같이 단면 1,2 부분에 대해 응력 선형화하여 응력강도를 얻는다. 응력선형화 단면의 두께는 7mm이다. 두 단면에 대한 응력 선형화 결과값을 표 4~6에 나타내었다. 표의 단위는 MPa이다.

먼저, 설계하중이 작용한 경우 응력선형화로 구한 응력강도값을 표 4에 나타내었다. 막응력(P_m), 막응력과 굽힘응력을 합한 값($P_m + P_b$)이 가장 높게 나타나는 부위는 단면 1로서 각각 105.7MPa과 121.4MPa의 값을 갖는다. 이 값은 설계온도(350℃)에서 재료의 설계응력강도값 110MPa, 165MPa과 비교하여 작은 값이다. 그러므로, 설계하중에서 용기는 구조적으로 건전하다고 말 할 수 있다.

수압시험하중이 작용할 때 응력강도를 구한 것은 표 5에 나타내었다. 막응력(P_m)이 제일 크게 작용하는 단면은 1번 단면이다. 이 단면의 막응력(P_m)값 132.1MPa과 허용한계 $0.9 S_y = 186.13MPa$ 를 비교할

때 막응력 값이 작은 값을 갖는다. $P_m + P_b$ 에서 P_m 이 $0.67 S_y$ 보다 작기 때문에 표 2의 Case 1에 해당하므로 $P_m + P_b$ 는 $1.35 S_y$ 와 비교를 해야 한다. 이 값들을 비교하면 $P_m + P_b$ 가 허용한계보다 적은 값을 가지므로 안전하다고 할 수 있다.

상부압력용기에 대해 열하중을 고려한 해석 결과는 그림 5~7에 나타내었다. 그림 5는 열하중 (convection)에 의해 구한 온도분포를 나타낸 것이다. 두께가 7mm인 용기 중간부의 단면에서 안쪽으로 온도분포가 $149.3 \sim 145^\circ\text{C}$ 의 높은 온도분포를 보이고 두꺼운 플랜지 바깥쪽에 가장 작은 123.8°C 의 온도를 보인다. 이 온도분포를 이용하여 열응력을 구한 것은 그림 6과 같다. 응력강도가 가장 큰 부분의 수치는 63.7MPa 이다. 열하중과 설계압력 17MPa 이 작용할 때의 응력강도분포는 그림 7과 같다. 압력용기 중간 하단부에 최대응력이 걸리는데 115MPa 의 응력강도값을 갖고 최소응력은 4.46MPa 의 값을 갖는다.

열하중과 설계압력이 동시에 작용할 때 응력선형화로 구한 응력강도값은 표 6에 나타내었다. 응력들의 총합이 제일 큰 단면 1과 응력한계 $3 S_m = 330\text{MPa}$ 를 비교하면, 해석에 의한 값이 응력한계보다 훨씬 작은 값을 갖는 것을 알 수 있으며 이것으로 열하중과 설계압력이 동시에 작용한 경우에 대해 용기는 구조적으로 안전함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 압력경계를 형성하는 제어봉 구동장치의 상부압력용기에 대한 응력 및 열해석을 수행하였다. 압력용기 내부에 압력하중이 작용하고 압력하중으로 설계압력과 수압력이 작용한 경우에 대해 해석을 수행하였고 열하중이 작용한 경우, 열하중과 설계압력이 작용한 경우의 열해석을 수행하였다. 상부압력용기에 대해 수행한 응력해석 결과값이 ASME 및 KEPIC MNB 규정의 허용한계를 만족한다. 그러므로, 설계압력과 수압력이 작용한 경우, 열하중이 작용한 경우 그리고 열하중과 설계압력이 작용한 경우에 대해 상부압력용기는 구조적으로 건전하다고 판단된다.

참고 문헌

1. 김지호 외 다수, “선형펄스모터형 제어봉 구동장치의 설계 개발”, 한국원자력연구소 기술보고서 KAERI/TR-1408/99, 1999
2. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1, Subsection NB, Class 1 Components, 1995.
3. 원자력기계 기술기준, 대한전기협회, 전력산업기술기준

표 1 설계조건에 대한 응력범주 및 응력강도한계

응력범주	1차응력		
	일반막응력	국부막응력	굽힘응력
기호	P_m	P_L	P_b
응력성분 및 응력강도 허용한계	$P_m < S_m$	$P_L < 1.5S_m$	$(P_m \text{ or } P_L) + P_b < 1.5S_m$

표 2 수압시험하중에 대한 응력범주 및 허용한계

응력범주	1차 응력		
	일반막응력 (P_m)	막+굽힘 응력강도($P_m + P_b$)	
응력성분 및 허용한계	$P_m < 0.9S_y$	Case 1. $P_m \leq 0.67S_y$ 의 경우 $P_m + P_b \leq 1.35S_y$	Case 2. $0.67S_y < P_m \leq 0.90S_y$ 의 경우 $P_m + P_b \leq (2.15S_y - 1.2P_m)$

표 3 1차 및 2차응력에 대한 응력범주와 응력강도한계

응력범주	1차			2차		피크응력 (F)
	일반막응력 (P_m)	국부 막응력 (P_L)	굽힘응력 (P_b)	팽창응력 (P_e)	막+굽힘응력 (Q)	
응력성분 및 응력강도 허용한계	$MAX(P_m \text{ or } P_L) + P_b + P_e + Q + F < 3S_m$					

표 4 설계하중에 대한 1차응력강도와 설계응력강도의 비교

Section	Node	P_m	$P_m + P_b$	S_m	$1.5S_m$
1	17-608	105.7	121.4	110	165
2	308-317	103.8	120.5		

표 5 수압력에 대한 1차응력강도와 허용한계의 비교

Section	Node	P_m	$P_m + P_b$	S_y	$0.9 S_y$	$0.67 S_y$	$1.35 S_y$
1	17-608	132.1	151.8	206.82	186.13	138.56	279.20
2	308-317	129.8	150.6				

표 6 열하중과 설계압력이 작용할 때 응력강도의 비교

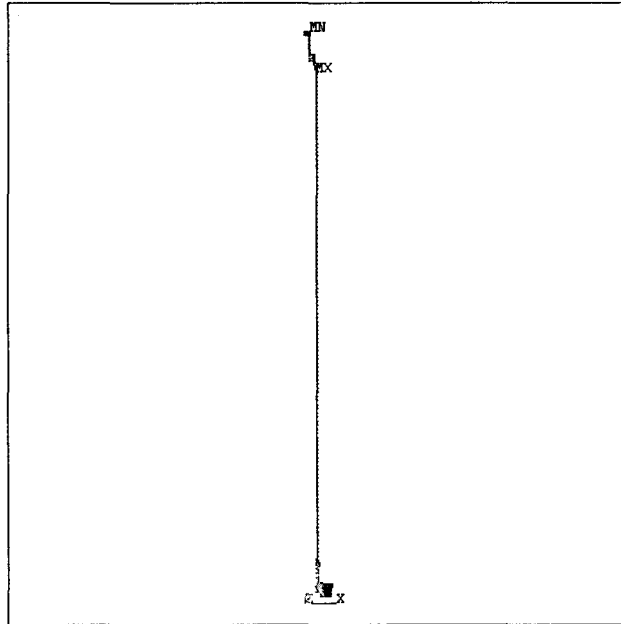
Section	Node	P_m	$P_m + P_b$	F	Total	$3 S_m$ at 350°C
1	17-608	105.8	114.6	0.033	114.6	330
2	308-317	104.2	112.8	0.029	112.8	



그림 1 제어봉구동장치
형상

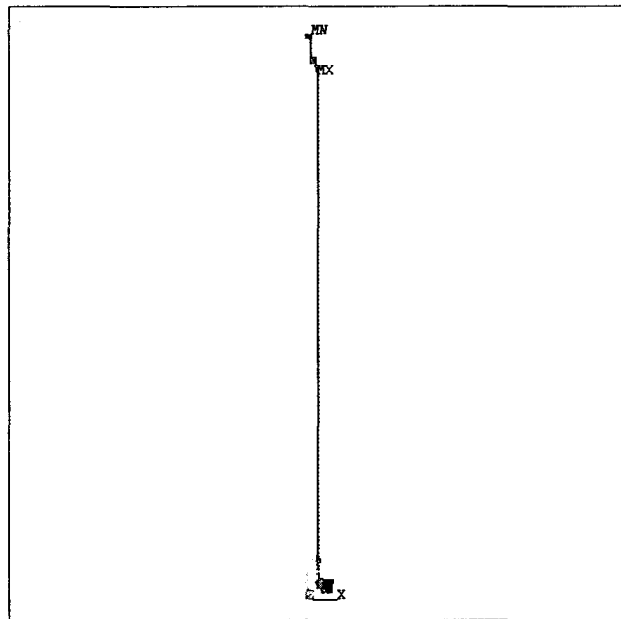


그림 2 응력선형화 단면



ANSYS 5.4
 JAN 4 2002
 14:14:40
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SINT (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX = .227E-03
 SMN = .137E+07
 SMX = .122E+09
 .137E+07
 .147E+08
 .281E+08
 .415E+08
 .548E+08
 .682E+08
 .816E+08
 .950E+08
 .108E+09
 .122E+09

그림 3 설계압력, 설계온도



ANSYS 5.4
 JAN 4 2002
 15:58:58
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 SINT (AVG)
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AVRES=Mat
 DMX = .284E-03
 SMN = .171E+07
 SMX = .152E+09
 .171E+07
 .184E+08
 .351E+08
 .518E+08
 .686E+08
 .853E+08
 .102E+09
 .119E+09
 .135E+09
 .152E+09

그림 4 수압력, 상온

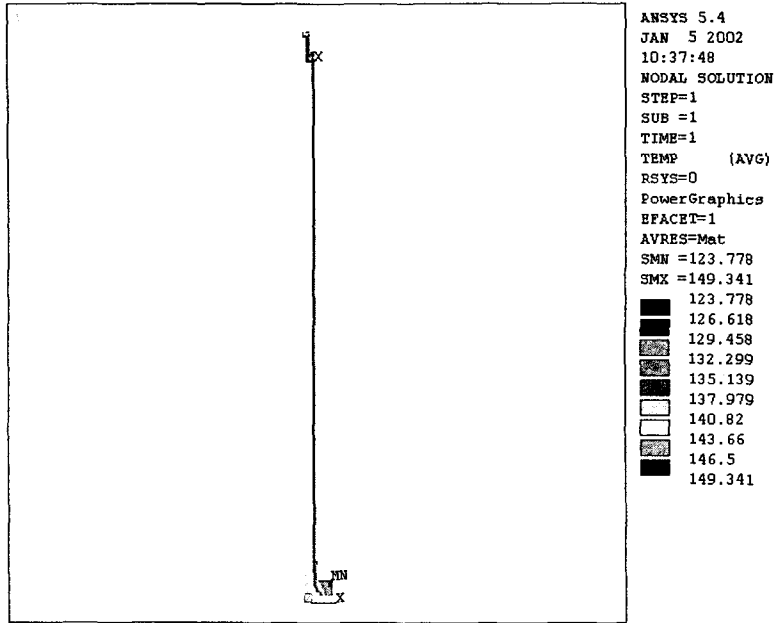


그림 5 온도분포

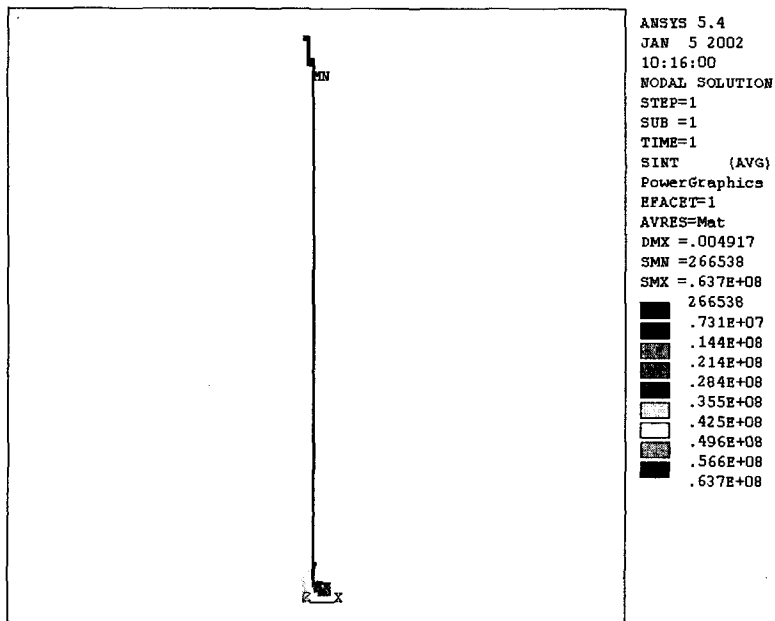


그림 6 열응력

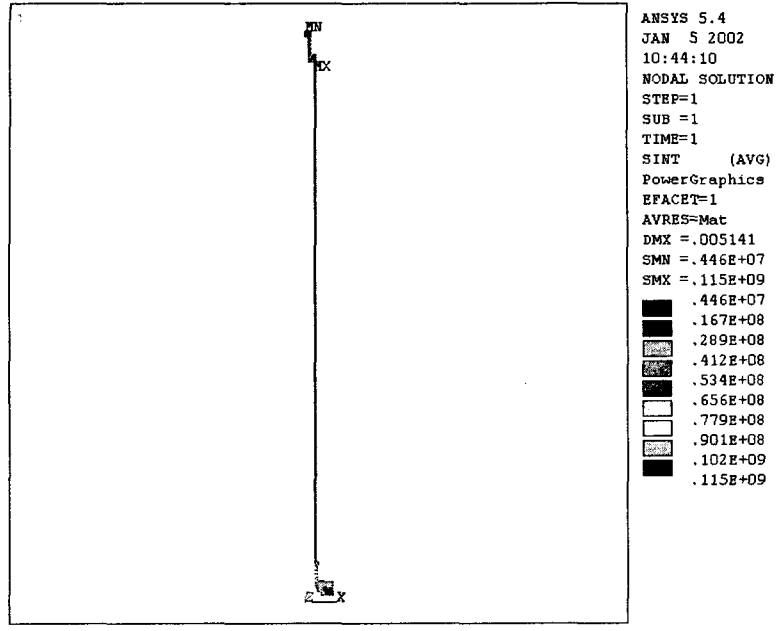


그림 7 열하중과 설계압력이 동시에 작용한 경우