

SMART 제어봉구동장치의 압력용기에 대한 피로수명평가 Fatigue Life Evaluation of Pressure Housing of SMART CEDM

조대회

한라산업(주)

부산광역시 사하구 다대동 1509-2

유제용, 김지호, 김종인

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

제어봉구동장치에서 압력경계를 형성하고 있는 압력용기의 피로에 대한 건전성을 평가해야 한다. ASME Sec. III 또는 KEPIC MNB의 설계기준과 해석으로 구한 값을 비교하였다. 안전해석을 수행하여 계산된 PRDBE, SRDBE와 제어봉구동장치 기동과 정지 그리고, 수압시험압력의 입력데이터를 이용하여 피로해석을 수행한다. 해석 프로그램으로 I-DEAS 코드와 ABAQUS 코드를 이용하였다. 해석으로 얻어진 사용계수가 1보다 작기 때문에 압력용기는 피로에 대해 건전한 것으로 확인되었다.

Abstract

The pressure housing forming pressure boundary in SMART CEDM must be evaluated the structural stability for fatigue. The value obtained by fatigue analysis is compared with the standard of ASME Sec. III and KEPIC MNB. Using the input data of PRDBE and SRDBE calculated by performing the safety analysis, the operation and stop of CEDM and the hydraulic test pressure, the fatigue analysis is performed. The analysis program is used to I-DEAS and ABAQUS. Because the usage factor obtained by the analysis is the value less than 1 with the limit, the stability of pressure housing is validated under fatigue.

1. 서론

제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism)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. 선형펄스모터형 제어봉구동장치에서 압력경계를 형성하고 있는 압력용기에 대해 구조 건전성을 평가해야 하는데 제어봉구동장치 압력용기는 위치지시기가 장착되는 상부압력용기와 선형펄스모터가 장착되는 하부압력용기 두 부분으로 이루어져 있다. ASME Sec. III[2] 또는 KEPIC MNB[3]의 규정에 따라 상·하부 압력용기에 대한 피로해석을 수행하였다. 해석 프로그램으로 I-DEAS 코드와 ABAQUS 코드를 이용하였다.

2. 설계기준 (Miner's Rule)

현저한 응력변동을 일으키는 응력사이클의 종류가 둘 이상일 경우 누적영향은 다음의 순서로 평가해야 한다.

각 유형의 응력사이클에 대해,

$$U_1 = \frac{n_1}{N_1}, U_2 = \frac{n_2}{N_2}, U_3 = \frac{n_3}{N_3}, \dots, U_n = \frac{n_n}{N_n} \text{ 으로부터 사용계수 } U_1, U_2, U_3, \dots, U_n \text{ 을}$$

계산한다.

$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$ 에서 누적사용계수 U 를 계산한다.

이 누적사용계수 U 는 1.0을 초과하지 않아야 한다.

여기서, $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n =$ 사용계수(usage factor), $U =$ 누적사용계수, $n_n =$ 적용된 사이클수, $N_n =$ 파단까지의 사이클 수이다.

3. 입력데이터

안전해석을 수행하여 계산된 PRDBE, SRDBE와 제어봉구동장치 기동과 정지와 수압시험 압력(21.3MPa)에 대한 입력데이터를 이용하여 피로해석을 수행한다. 하중조건에 따른 온도와 압력의 최대, 최소값을 정리하여 표 1에 나타내었다.

압력용기의 재료는 STS321를 사용한다. 이 재료는 ASME Section III Division 1-Appendices의 TABLE I-9.1에서 항복강도(S_y)가 30ksi인 경우에 해당하며 S-N 데이터는 표 2에 나타낸 바와 같다. 이 데이터를 이용한 설계피로곡선은 그림 2와 같이 도시된다. 이 곡선은 사이클회수에 대하여 반복응력강도성분의 허용크기 S_a 를 나타내며 ABAQUS/SAFE상에서 재료의 물성으로 입력이 된다.

해석과정으로 I-DEAS 코드에서 모델과 경계조건을 형성하고 ABAQUS 코드에서 응력해석을 수행한다. 응력해석을 수행한 다음 발생회수만큼 반복하중을 적용하게 된다. ABAQUS/SAFE에서 피로해석을 수행하고 피로해석에 사용한 해석 모델은 평균응력 영향을 고려한 Goodman 모델을 사용하였다.

4. 해석결과

그림 3~6는 피로해석을 수행하여 얻은 상부압력용기에 작용하는 피로분포 형상을 나타낸 것이다. 결과값은 그림의 상단 좌측에 위치하고 Log scale값을 갖는다. 피로수명반복회수는 결과값이 x 일 때 10^x 를 취하여 구할 수 있다. 예를 들어, 기동과 정지의 하중조건일 때 제 1일 작은 로그값이 7.088이면 $10^{7.088} = 12246162$ cycle이다. 여기서, 결과값이 작을수록 피로에

취약하다는 것을 의미한다. 각 하중조건마다 가장 작은 결과값으로 피로수명반복회수를 구하고 이 값들을 표 3에 정리하였다. 상부압력용기는 긴 형상이기 때문에 피로분포 형상을 상단과 하단으로 나누어 나타내었다. 그림 3, 4는 기동과 정지의 하중조건일 때 상부압력용기의 상단과 하단부의 피로분포 형상을 보이고 있으며 그림 5와 6는 수압력의 하중조건일 때 상단과 하단의 피로분포 형상을 나타낸다. 그림 7~10는 하부압력용기의 상단과 하단의 피로분포형상을 나타낸다. 그림 7과 그림 8는 제어봉구동장치를 기동과 정지의 하중조건일 때 상단과 하단의 피로분포 형상을 나타내고 있으며 그림 9과 그림 10는 수압력의 하중조건일 때 피로분포 형상을 나타낸다. 대표적으로, 제어봉 구동장치 기동과 정지, 수압시험압력이 작용한 경우를 선정하여 나타내었다. 상부압력용기의 중간부와 하부압력용기의 상단부가 다른 부위에 비해 상대적으로 피로에 취약하다는 것을 알 수 있다.

이들 변동상태의 온도와 압력이 작용하는 압력용기의 피로해석을 수행하여 구한 사용계수 값들을 표 3에 나타내었다. 피로수명반복회수를 발생회수로 나누면 사용계수를 얻는다. 각 사용계수들을 합한 누적사용계수는 상부압력용기에서 $6.5E-03$, 하부압력용기에서 $5.5E-03$ 의 값을 갖는다. 이 값들은 ASME 및 KEPIC MNB 규정의 누적사용계수 1을 초과하지 않는다. 그러므로, 상·하부 압력용기는 피로에 대해 구조적으로 건전하다고 판단된다.

5. 결 론

제어봉구동장치에서 압력경계를 형성하고 있는 압력용기의 피로에 대한 건전성을 평가해야 한다. ASME Sec. III 또는 KEPIC MNB의 규정에 따라 압력용기에 대한 피로해석을 수행하였다. 해석 프로그램으로 I-DEAS 코드와 ABAQUS 코드를 이용하였다. 각 사용계수들을 합한 누적사용계수는 상부압력용기에서 $6.5E-03$, 하부압력용기에서 $5.5E-03$ 의 값을 갖는다. 이 값들은 ASME 및 KEPIC MNB 규정의 누적사용계수 1을 초과하지 않는다. 그러므로, 상·하부 압력용기는 피로에 대해 구조적으로 건전하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김지호 외 다수, “선형펠스모터형 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 온도와 압력변동

하중조건	온도변동(℃)		압력변동(MPa)	
	Min	Max	Min	Max
PRDBE2	89.86	92.21	14.8	15.6
PRDBE7	89.86	91.69	14.8	15.5
PRDBE8	91.69	93.09	15.1	15.5
PRDBE9	89.77	90.14	14.7	15
PRDBE10	90.14	103.34	14.9	16
PRDBE25	91.91	94.48	13.6	15.3
SRDBE3	90.28	93.86	14.7	16.3
SRDBE4	90.03	91.34	12.4	15.9
SRDBE10	90.45	109.45	13.6	17.5
SRDBE13	90.44	114.28	13.6	17.2
SRDBE16	89.89	93.21	14.5	16.7
SRDBE20	89.88	96.24	15	17.1
CEDM 기동과 정지	50	90	0	15
수압시험	-	-	0	21.3

표 2 STS321 재료의 S-N값

피로수명(N)	1E1	2E1	5E1	1E2	2E2	5E2	1E3	2E3	5E3	1E4	2E4	5E4	1E5	2E5	5E5	1E6
반복응력강도 (S_a , MPa)	1792.5	1309.9	861.7	654.9	503.2	358.5	303.3	248.1	196.4	168.9	134.4	103.4	89.6	79.2	65.4	62.04

표 3 CEDM 상부압력용기와 하부압력용기의 피로수명 결과

PRDBE2	20,000	3.8E+06	5.2E-03	5.2E+06	3.8E-03
PRDBE7	60	1.3E+10	4.6E-09	5.2E+06	1.2E-05
PRDBE8	60	6.6E+09	9.1E-09	2.9E+06	2.1E-05
PRDBE9	60	1.8E+09	3.3E-08	1.6E+08	3.8E-07
PRDBE10	60	3.0E+06	2.0E-05	8.2E+06	7.3E-06
PRDBE25	3,000	2.5E+06	1.2E-03	2.1E+06	1.4E-03
SRDBE3	30	2.5E+09	1.2E-08	2.7E+07	1.1E-06
SRDBE4	1	9.6E+06	1.0E-07	1.6E+07	6.3E-08
SRDBE10	15	1.6E+07	9.4E-07	4.4E+06	3.4E-06
SRDBE13	1	1.8E+07	5.6E-08	1.6E+07	6.3E-08
SRDBE16	30	1.3E+09	2.3E-08	4.9E+08	6.1E-08
SRDBE20	15	8.2E+08	1.8E-08	1.9E+06	7.9E-06
CEDM	700	1.2E+07	5.8E-05	2.1E+07	3.3E-05
	30	3.4E+05	8.7E-05	2.7E+05	1.1E-04
	-	-	6.6E-03	-	5.5E-03



그림 1 제어봉구동장치 형상

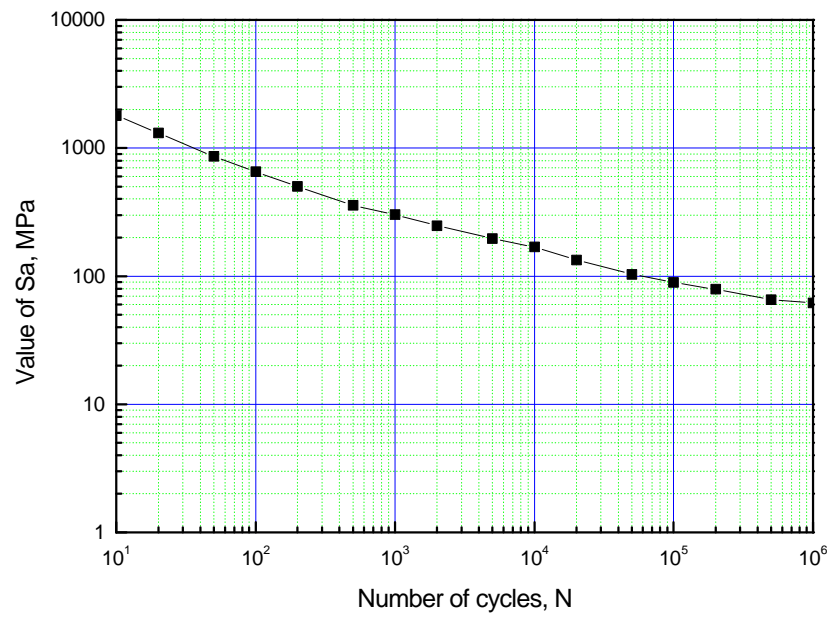


그림 2 STS321 재료의 S-N곡선

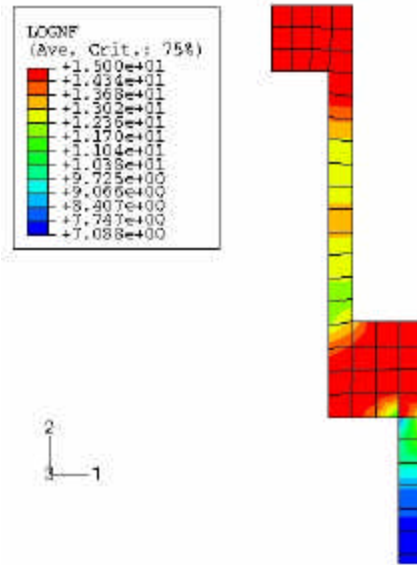


그림 3 상부압력용기(기동과 정지, 상단)

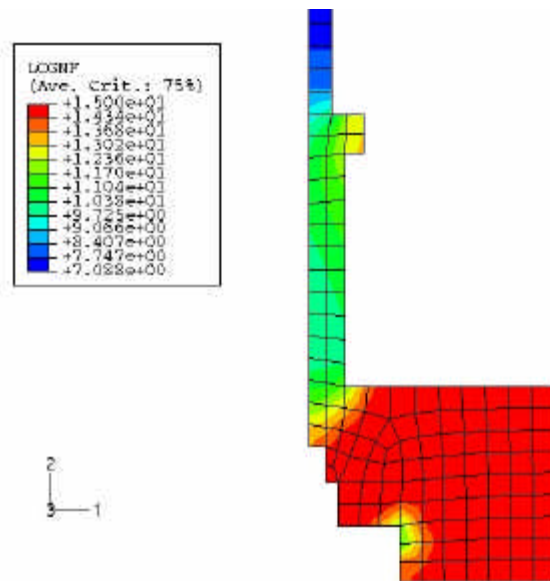


그림 4 상부압력용기(기동과 정지, 하단)

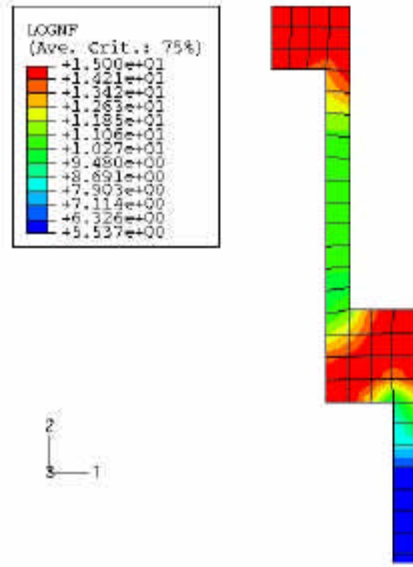


그림 5 상부압력용기(수압력, 상단)

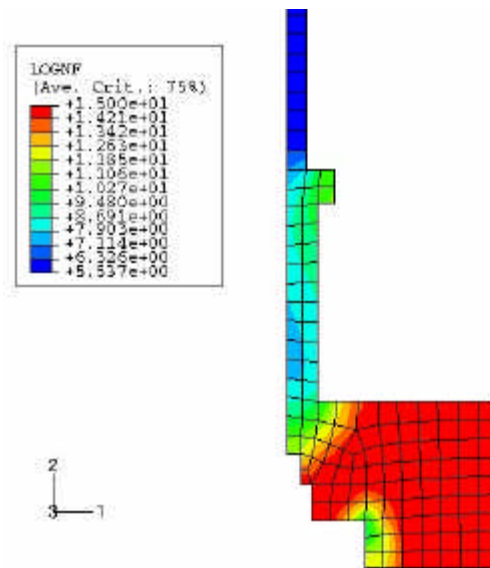


그림 6 상부압력용기(수압력, 하단)

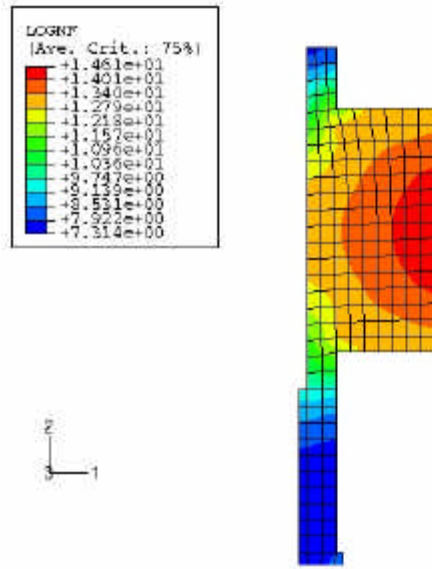


그림 7 하부압력용기(기동과 정지, 상단)

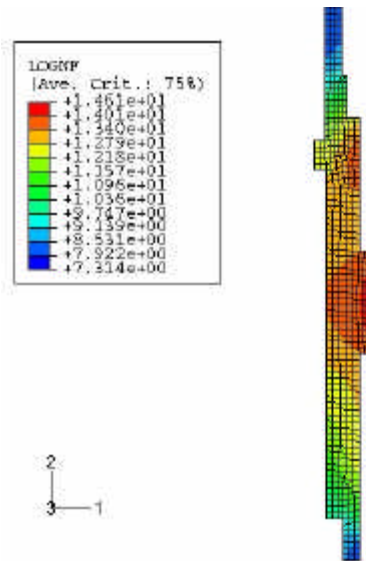


그림 8 하부압력용기(기동과 정지, 하단)

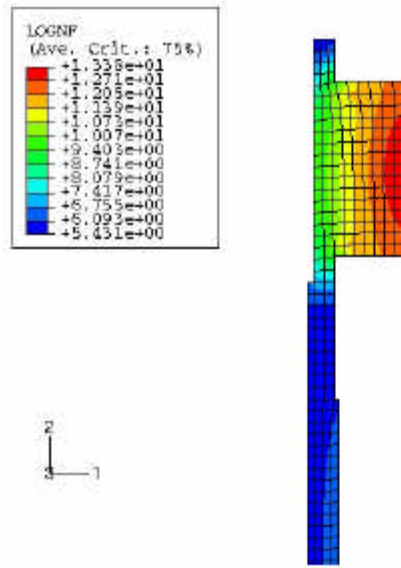


그림 9 하부압력용기(수압력, 상단)

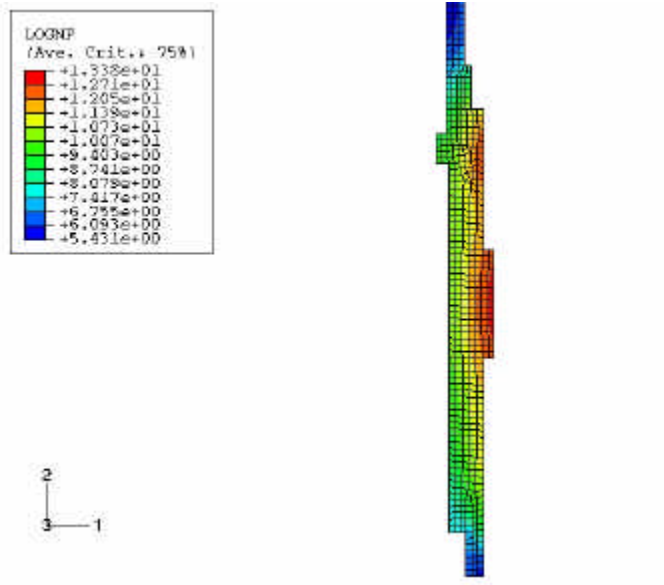


그림 10 하부압력용기(수압력, 하단)