2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 냉각재순환펌프 플랜지의 구조건전성 평가
Structural Integrity Evaluation of MCP Flange of SMART

박진석, 김종인
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문에서는 SMART 냉각재순환펌프 플랜지의 구조건전성 평가를 위하여 열응력 및 압력에 의해 발생하는 응력해석을 수행하였다. 냉각재순환펌프 플랜지는 일차냉각수의 압력경계를 유지하는 부품으로서 KEPIC MNB의 설계기준에 준하여 평가하여야 한다. 플랜지의 응력해석을 위하여 축대칭 유한요소 모델을 사용하였다. 해석모델의 경계조건은 열응력 해석을 위한 대류 조건과 구조 응력해석을 위한 압력하중 및 자유도 구속 조건을 적용하였으며 압력하중은 설계온도에 대한 설계압력 조건과 상온에서의 수압시험 압력을 적용하였다. 유한요소 해석은 상용 코드인 I-DEAS와 ANSYS를 사용하였으며, 설계기준에 따라 플랜지의 구조건전성을 평가한 결과를 제시하였다.

Abstract

Thermal stress and mechanical stress analyses are performed to evaluate the structural integrity of the MCP flange of SMART. The structural integrity of the MCP flange which is the pressure barrier of primary coolant has to be evaluated according to the KEPIC MNB design criteria. An axisymmetric finite element model is used to perform the thermal stress and mechanical stress analyses of the MCP flange. Proper DOF and thermal convection conditions are applied for the boundary condition of the axisymmetric model. The design pressure at design temperature and the hydraulic test pressure at room temperature are applied for mechanical load conditions. I-DEAS and ANSYS are used to perform the stress analysis of the flange. The results of the structural integrity evaluation of MCP flange are presented in this paper.

1. 서론

SMART 냉각재순환펌프(MCP : Main Coolant Pump)는 원자로 압력용기 상단에 수직으로 설치되어 작동하는 축류 캔드모터 펌프로서 원자로와 MCP를 연결하는 배관계통이 없다. 상용 원자로 냉각재펌프는 대형 배관으로 원자로에 연결되어 작동하기 때문에 LOCA(loss of coolant accident)와 같은 냉각재 누출 사고가 일어날 수 있다. 그러나 SMART MCP에서는 이와 같이 대형 배관이 없기 때문에 MCP 배관을 통하여 일차냉각재가 누수 되는 사고를 근본적으로 방지할 수 있다. 따라서 MCP의 여러 부품 중에서 일차냉각재의 압력경계를 유지하고 있는 부품에 대하여 구조건전성을 평가하면 MCP에서 일차냉각재가 외부로 누수 되는 사고를 방지할 수 있다.

MCP는 정상운전시 고온 고압의 일차냉각수를 원자로내부로 순환시키는 역할을 한다. 그러므로 냉 MCP의 압력경계를 이루는 구조물 내부와 바깥쪽에는 온도 구배(temperature gradient)가 발생하게되고 열응력이 발생한다. 이와 같이 압력경계 내벽과 외벽 사이의 두께에서 발생하는 온도분포와 열응력을 계산하여 압력하중에 의하여 발생하는 응력을 중첩하여 구조물의 구조건전성을 평가하여야한다. MCP 압력경계를 이루는 여러 부품 중에서 플랜지의 구조건전성을 평가하기 위한 유한요소 모델을 작성하고 유한요소 해석 코드인 I-DEAS와 ANSYS를 사용하여 열해석 및 응력해석을 수행하였으며, KEPIC MNB 설계기준에 준하여 구조건전성을 평가하였다.

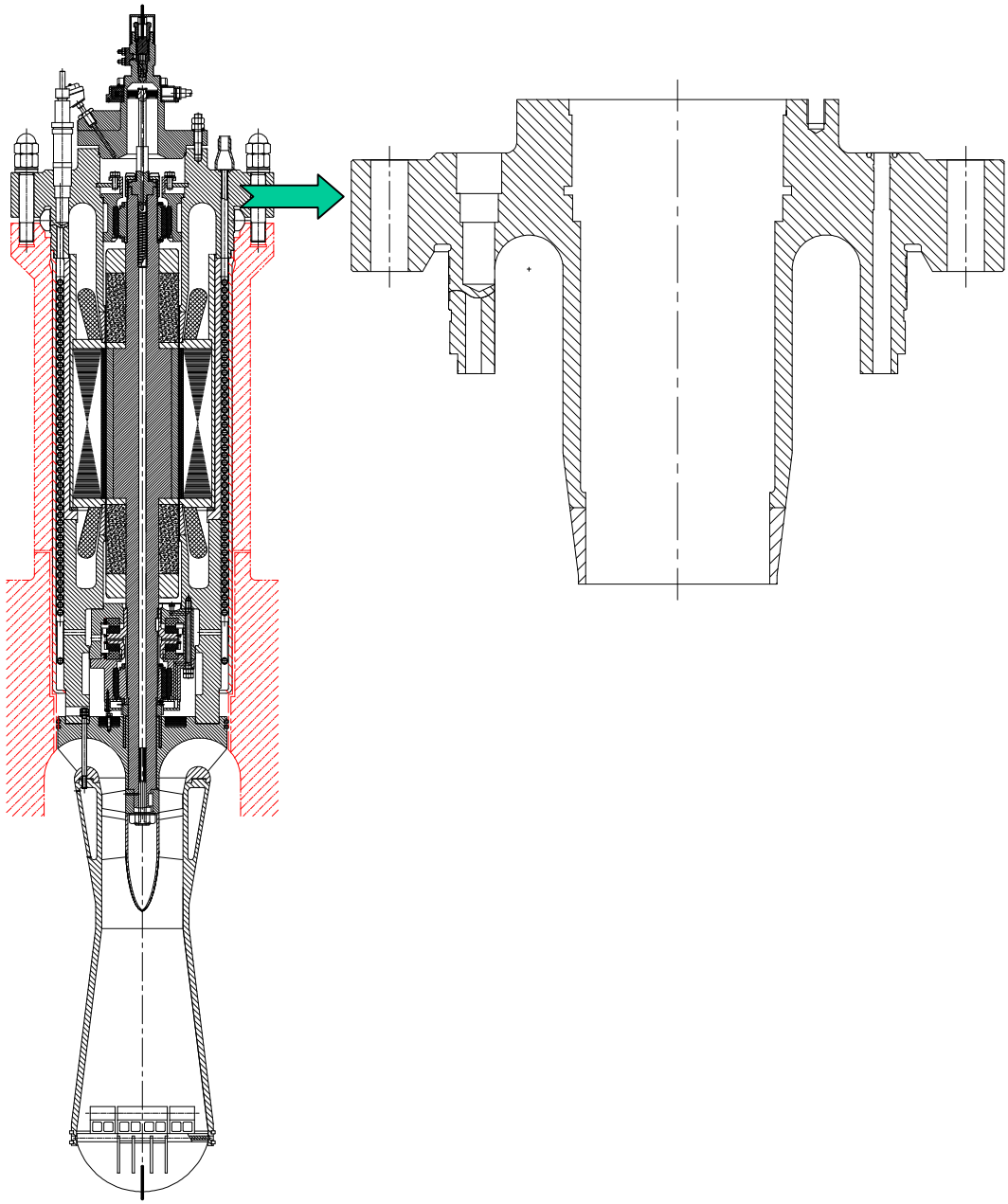

그림 1 냉각재순환펌프 및 일차냉각재 압력경계인 플랜지의 형상

2. 본론

2.1 유한 요소 모델

가. 플랜지 열해석

MCP 압력경계를 이루는 플랜지의 실제형상은 매우 복잡하여 해석을 위한 모델로는 적합하지 않다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 형상을 단순화하여 해석하기 위한 모델을 재 작성하였다. 그림 1은 MCP의 형상을 나타낸 것이며 그림 2는 실제형상을 해석하기 위하여 축대칭 모델로 단순화 시켜서 해석을 효과적으로 할 수 있게 하였다. 압력경계 구조물의 열해석을 수행하기 위하여 기본적으로 필요한 자료는 열전달 계수와 구조물 경계에서의 온도를 알아야한다. 특히 열전달 계수는 그 값을 알기 어려운 것으로서 본 논문에서는 참고문헌에 있는 값을 인용하여 사용하였다. 추 후 좀 더 정확한 값을 적용하여 해석을 수행하여 평가할 예정이다. 열해석을 위하여 그림 2에서 MCP MCP 플랜지 경계에 적용되는 열전달 계수와 주변 온도는 다음과 같다.

A 부분 대류경계조건 $2500 W/m^2K$과 주위 온도 100℃

B 부분 대류경계조건 $30 W/m^2K$와 주위 온도 50℃

C 부분 대류경계조건 $344 W/m^2K$와 주위 온도 50℃

D 부분 대류경계조건 $15 W/m^2K$와 주위 온도 110℃

그림 본 논문에서 해석하고자 하는 플랜지 형상은 그림 1과 같이 스터드와 온도 측정장치, 회전속도 측정장치, 그리고 배기 밸브가 조립된다. 따라서, 해석을 위하여 그림 1의 플랜지 전체 형상을 그림 2와 같이 축대칭 모델로 구성하였다.

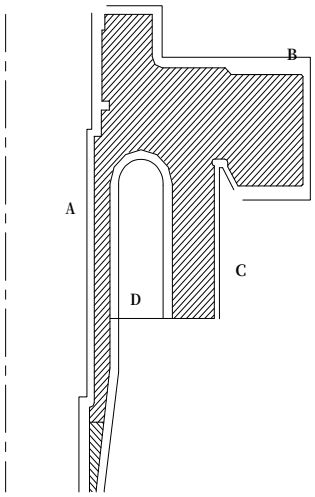

그림 2 MCP 플랜지에 대한 열하중 조건

플랜지의 열해석을 수행하기 위하여 작성된 축대칭 해석 모델로서 절점 수는 429개이고 격자 수는 341개이다. 해석을 위하여 필요한 물성치는 선형 탄성 해석을 위한 탄성계수와 프와송수(0.29), 그리고 열 해석을 위한 열전도 계수, 열팽창 계수 등이 있다. 플랜지의 일부 구간의 강도를 보강하기 위하여 고강도 재질(SA564-T630)을 STS321과 용접하여 사용하였으며, 위의 재료에 대한 탄성계수, 열전도 계수, 열팽창 계수는 표 1 및 표 2와 같다. 이와 같은 모델을 이용하여 플랜지에서 발생하는 온도 분포를 얻었으며, 그림 3은 플랜지의 온도분포를 나타낸 것이다.

나. 플랜지 응력해석

MCP 부품 중에서 고온 고압의 일차냉각재를 유지하는 압력경계를 이루는 대표적인 부품으로는 플랜지가 있다. 이와 같이 원자력 분야에 사용되는 부품 중에서 고온 고압의 압력경계를 형성하는 부분은 ANSI/ANS-51.1의 안전 등급 기준에 따라서 1등급으로 분류하여 ASME NB 또는 전력기술기준(KEPIC) MNB를 적용하여 설계를 수행하여야 한다.

MCP 플랜지는 열하중과 기계적 하중이 동시에 작용한다. 열하중은 주로 압력경계를 이루고 있는 실린더의 두께방향에 분포된 온도구배에 의해서 발생하며, 기계적 하중의 대부분은 내부에 작용하는 압력으로 인해 발생한다. 따라서 열하중과 압력하중을 중첩하여플랜지에 발생하는 응력을 구한 후에 KEPIC MNB의 설계 기준에 준하여 구조건전성을 평가하였다. KEPIC MNB 설계기준에 따르면 설계압력이 작용할 때와 수압시험 압력이 작용할 때 구조건전성을 평가하는 방법은 다르며 표 3과 같다.

구조물에 발생하는 응력을 일차막응력(P_m), 굽힘응력(P_b), 2차응력, 피크응력 등으로 분류한 후에 재료의 설계응력강도(S_m) 혹은 허용항복응력(S_y)과 비교하여 구조건전성을 평가한다.

1차응력이란 외력, 내력 및 모멘트의 평행조건을 만족시키기 위해 부과되어야 하는 하중에서 발생하는 수직응력 또는 전단응력을 말한다. 1차응력의 기본적인 특성은 가지제한성(self-limiting)이 없다는 것이며, 이 1차응력이 항복강도를 상당히 초과하게 되면 파손이 되거나 최소한 전체적 변형이 발생하게 된다. 따라서, 1차응력의 평가는 기기의 구조적 건전성 평가에 필수적인 응력이다. 1차응력은 내압 또는 분포 활하중(distribute live load)으로 인해 원통형 또는 구형 동체에 발생하며 압력으로 인해 평경판(flat head) 중앙부에 발생하는 굽힘응력으로 발생한다. 열하중으로 발생하는 열응력은 1차응력으로 분류하지 않는다.

표 1 플랜지 재료(STS321) 물성치

온도	열전도 계수	열팽창 계수	탄성계수	설계응력강도(S_m)
℃	J/M/K/S	mm/mm//K	Pa	MPa
21	14.019	1.6020E-05	195.12E9	-
38	14.538	1.6254E-05	-	137.88
66	14.884	1.6434E-5	-	-
93	15.230	1.6614E-5	190.30E9	137.88
121	15.750	1.6794E-5	-	-
149	16.269	1.6938E-5	186.16E9	137.88
177	16.615	1.7082E-5	-	-
204	17.134	1.7226E-5	182.71E9	128.23
232	17.480	1.7352E-5	-	-
260	18.000	1.7496E-5	177.88E9	118.58
288	18.346	1.7604E-5	-	-
316	18.865	1.7730E-5	174.44E9	113.06
343	19.211	1.7856E-5	-	110.99
371	19.730	1.7964E-5	170.99E9	109.61
399	20.077	1.8072E-5	-	108.23
427	20.596	1.8180E-5	166.16E9	106.86

표 2 플랜지 재료 중 SA564-T630 물성치

온도	열전도 계수	열팽창 계수	탄성계수	설계응력강도(S_m)
℃	J/M/K/S	mm/mm//K	Pa	MPa
21	17.134	1.0602E-5	195.12E9	310.24
38	17.480	1.0602E-5		310.24
66	18.000	1.0602E-5		310.24
93	18.346	1.0620E-5	190.30E9	310.24
121	18.865	1.0620E-5	-	310.24
149	19.348	1.0620E-5	186.16E9	310.24
177	19.730	1.0638E-5	-	-
204	20.250	1.0638E-5	182.71E9	301.96
232	20.769	1.0638E-5	-	-
260	21.115	1.0638E-5	177.88E9	295.07
288	21.634	1.0674E-5	-	-
316	21.980	1.0728E-5	174.44E9	290.24
343	22.500	1.0782E-5	-	288.86
371	22.846	1.0854E-5	170.99E9	-
399	23.192	1.0944E-5	-	-
427	23.365	1.1052E-5	166.16E9	-

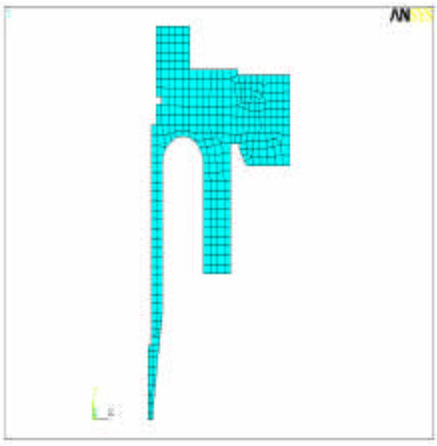

그림 3 플랜지의 축대칭 해석모델 격자

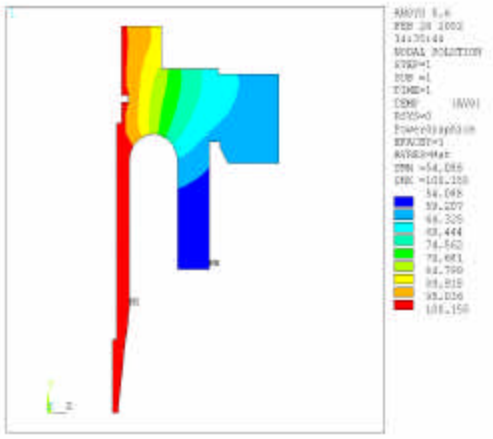

그림 4 MCP 플랜지의 온도분포

2차응력이란 인접재료의 구속또는 구조물의 자기구속(self-constraint)으로 생기는 수직응력 또는 전단응력을 말한다. 2차응력의 기본특성은 자기제한성을 갖는다는 것이다. 국부적인 항복 및 작은 변형(distortion)이 생겨도 이는 2차응력을 발생시키는 조건을 만족시킬 수 있으므로 이 응력의 한번 작용으로는 파손이 생기지 않는다. 2차응력의 예는 일반 열응력과 구조 불연속부에서의 굽힘응력이 있다.

피크응력(F)이란 응력집중의 영향을 포함하여 국부불연속 또는 국부열응력으로 인하여 1차 및 2차 응력의 합에 추가되는 응력이다. 피크응력의 기본특성은 뚜렷한 변형을 일으키지 않으나 피로균열 또는 취성파괴 등의 원인이 될 가능성이 있다는 점이다. 본 논문에서는 열하중, 설계압력, 수압시험 압력의 하중조건에 대한 응력범주를 유한요소해석을 통하여 구하였으며 응력강도한계와 비교하여 기기의 구조 건전성을 평가하였다.

표 3 KEPIC MNB의 응력평가 요건

하중분류 / 응력분류		설계하중	수압시험 하중	
1차 응력	P_m	$< S_m$	$0.9S_y$	
	$P_m + P_b$	$< 1.5S_m$	① $0.65S_y \leq P_m$ 이면 $< 1.35S_y$	② $0.65S_y < P_m \leq 0.9S_y$ 이면 $< 1.25S_y - 1.2P_m$
1차+2차+피크응력(F)		$< 3.0S_m$	-	

플랜지의 응력해석을 수행하기 위한 유한요소 모델은 열해석에서 사용한 축대칭 모델과 동일하다. 그러나 플랜지의 경계조건과 하중조건은 그림 5와 같으며, 설계압력(17MPa)과 수압시험압력(21.5MPa)으로 나누어 작용시켰고 응력해석을 수행하기 위하여 체결부분에 대하여 y 방향에 대하여 구속시켰다.

2.2 해석 결과

구조물에 발생하는 응력의 계산은 설계압력이 작용할 때와 수압시험 압력이 작용할 때로 분리하여 계산하였다. 설계압력 17MPa이 작용할 때는 열하중이 동시에 작용하지만 수압시험 압력 21.5MPa가 작용할 때는 열하중이 작용하지 않는다. 그림 6은 플랜지에 설계하중과 열하중이 작용할 때 발생하는

응력강도 분포도를 나타내는 것이다. 수압시험압력이 작용할 때 플랜지에 발생하는 응력강도 분포는 그림 7과 같다.

설계압력과 열하중이 동시에 작용할 때와 수압시험압력이 작용할 때 구조물에 발생하는 응력강도 분포를 구한 후에 구조물에서 가장 높은 응력강도가 발생하는 단면의 두께방향으로 응력을 선형화하여 막응력, 굽힘응력, 열응력, 피크응력 등을 구하여 KEPIC MNB의 설계기준인 표 3에 따라 평가하여야 한다. 플랜지에 발생하는 응력강도 분포를 조사한 후에 높은 응력강도가 발생하는 단면은 그림 8과 같으며, 이 단면을 따라 응력을 선형화하여 구조건전성을 평가하였다. 설계압력 및 열하중이 작용할 때 응력 선형화 결과는 다음과 같다.

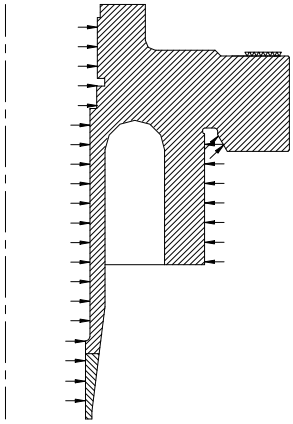

그림 5 플랜지 응력해석을 위한 경계조건

$$P_m = 206.00MPa < S_m = 288.86MPa$$

$$P_m + P_b = 227.10MPa < 1.5S_m = 433.29MPa$$

그리고 수압시험하중이 작용할 때 응력 선형화 결과는 다음과 같다.

$$P_m = 258.80MPa < 0.9S_y = 651.5MPa$$

$$P_m = 258.80MPa < 0.67S_y = 485MPa \text{ 이므로}$$

$$P_m + P_b = 284.50MPa < 1.35S_y$$

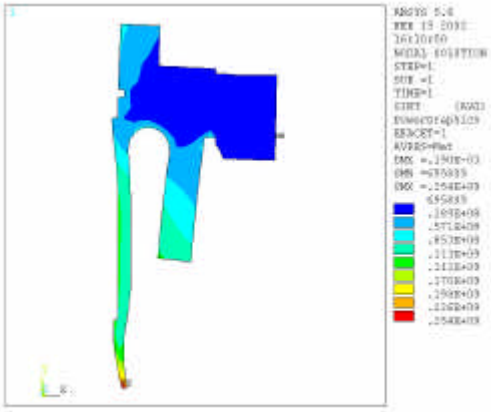

그림 6 설계압력 작용시 플랜지에 발생하는 응력강도 분포

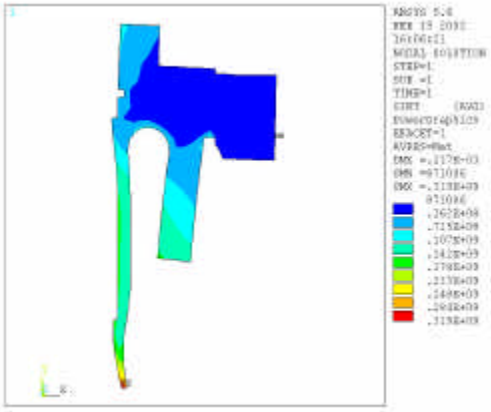

그림 7 수압시험압력 작용시 플랜지에 발생하는 응력강도 분포

표 4는 설계압력 및 열하중이 작용할 때 플랜지의 각 단면에서 응력을 선형화하여 비교한 값을 정리한 것이다. 그리고 표 5는 수압시험압력이 작용할 때 플랜지의 각 단면에 발생하는 응력을 선형화하여 비교한 값을 나타내는 것이다. 구조물은 1개의 재질로 제작되었지만 플랜지는 전체 구조물 중에서 일부 강도가 요구되는 부분에 강도가 높은 이종 금속으로 용접되어 있다. 따라서 플랜지에서 응력 선형화는 STS321 재질로 이루어진 부분과 SA564-T630 재질로 이루어진 부분으로 나누어 살펴보았으며, 어느 쪽도 설계기준에서 요구하는 응력 기준치를 넘지 않았다. 이와 같은 결과를 볼 때 플랜지에 발생하는 응력은 설계압력, 열하중, 수압시험압력이 작용하더라도 KEPIC MNB에서 요구하는 설계 기

준치보다 낮기 때문에 구조적건전성을 유지할 수 있다고 판단할 수 있다.

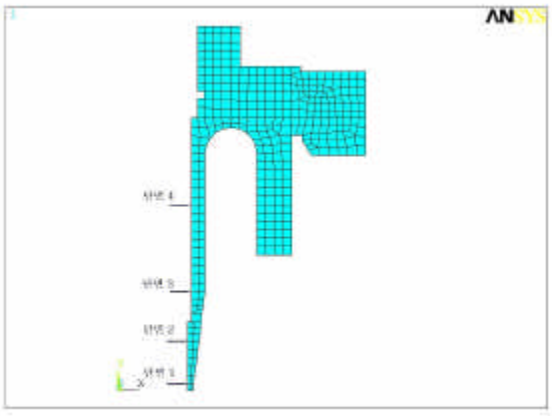

그림 8 플랜지에서 응력 선형화를 위한 단면

3. 결론

본 논문에서는 SMART MCP 플랜지에 대한 열응력 및 설계압력하중이 작용할 때 발생하는 응력을 중첩하여 구한 후에 KEPIC MNB의 설계기준에 준하여 일차막응력, 굽힘응력, 이차응력 등과 같은 응력범주로 분리하여 구하였다. 이 응력범주에 따라 구한 값과 재료의 응력강도한계와 비교하였으나, 모두 기준치 이하이기 때문에 플랜지는 구조건전성을 유지할 수 있다고 판단된다. 또한 수압시험압력이 작용할 때 구조건전성의 평가는 설계압력하중이 작용할 때 적용하는 응력강도한계 값과는 달리 다른 응력한계 값을 적용한다. 이와 같은 방법으로 수압시험압력이 작용할 때도 플랜지는 구조건전성을 유지함을 보였다.

표 4 설계압력 및 열하중 작용시 응력강도(MPa)

재료구분	단면	P_m	P_m+P_b	응력강도한계	
				S_m	$1.5S_m$
STS321	1	97.16	120.00	P_m<110.00	P_m+P_b<165.00
	2	47.92	72.07	P_m<110.00	P_m+P_b<165.00
	3	93.79	103.40	P_m<110.00	P_m+P_b<165.00
	4	53.75	104.60	P_m<110.00	P_m+P_b<165.00
SA564-T630	1	206	227.10	P_m<288.86	P_m+P_b<433.29
	2	113.60	138.40	P_m<288.86	P_m+P_b<433.29
	3	100.40	116.80	P_m<110.00	P_m+P_b<165.00
	4	102.70	118.20	P_m<110.00	P_m+P_b<165.00

표 5 수압시험압력 작용시 응력강도(MPa)

기기구분	단면	P_m	P_m+P_b	응력한계		
				$0.9S_y$	$0.65S_y$	$1.35S_y$
STS321	1	99.18	151.2	P_m<186.13	P_m<138.56	P_m+P_b<206.81
	2	60.50	90.30	P_m<186.13	P_m<138.56	P_m+P_b<206.81
	3	117.50	129.60	P_m<186.13	P_m<138.56	P_m+P_b<206.81
	4	67.35	131.10	P_m<186.13	P_m<138.56	P_m+P_b<206.81
SA564-T630	1	258.80	284.50	P_m<651.50	P_m<485.00	P_m+P_b<723.88
	2	142.70	173.40	P_m<651.50	P_m<485.00	P_m+P_b<723.88
	3	125.90	146.30	P_m<186.13	P_m<138.56	P_m+P_b<206.81
	4	128.70	148.10	P_m<186.13	P_m<138.56	P_m+P_b<206.81

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, SMART MCP 기본설계보고서, KAERI/TR-2135/2002, 2002. 3.

[3] 임영빈 외 다수, SMART 냉각재순환펌프 상부덮개의 열 및 응력해석, 한국원자력학회 2001, 추계학술대회, 2001. 10.

[4] *I-DEAS Master series*, Version 8, SDRC Korea.