

SMART 증기발생기 모듈급수헤더 피로해석

Fatigue Analysis of SMART Steam Generator Module FW Header

김용완, 김종인, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

김충관
현대티타늄(주)

요 약

일체형원자로 SMART에 내장되는 증기발생기 모듈급수헤더는 열피로하중을 많이 받는 부품이다. 본 연구에서는 선행연구에서 수행된 모듈급수헤더의 열응력해석결과를 바탕으로 피로평가를 수행하였다. 모듈급수헤더는 PT-3V티타늄 합금으로 설계되어 관련기술기준에 응력-수명선도가 제공되지 않는다. 따라서 PT-3V에 대한 S-N곡선을 실험으로 구하여 피로해석에 사용하였다. 평균응력이 피로수명에 미치는 영향을 다양한 방법으로 고려하여 비교하였는데 PT-3V 티타늄합금으로 설계된 경우 Soderberg의 모델에서 평균응력효과가 가장 크게 고려되어 보수적으로 결과를 보였다. 응력이 크게 작용하고 있는 모듈급수헤더 튜브시트부위에 대해 설계수명을 역으로 계산하여 평가한 결과 모듈급수헤더는 피로수명관점에서 안전함을 보였다. 증기발생기에 대한 3차원 모델을 개발한 후 이를 이용하여 응력해석을 하고 응력해석결과를 이용하여 피로해석을 수행함으로써 증기발생기 설계에서 수명예측까지를 CAE로 연결하였다.

Abstract

Module feedwater header, which is made of PT-3V titanium alloy is subjected to high thermal fatigue loading during the operation of integral reactor SMART. In this research, fatigue analysis has been performed for the module feedwater header based on the previous stress analysis results. S-N curve of PT-3V, which was used for the present fatigue analysis, had been obtained from the experiment. The effect of mean stress on the fatigue life was estimated for various mean stress model. Soderberg model was proven to be most conservative for PT-3V material. It has been shown that module feedwater header is safe for the lifetime of the steam generator in the view point of fatigue. For the feedwater module header of SMART steam generator, a sequential activity has been carried out from the design to the lifetime estimation based on 3D CAE model.

1. 서론

한국원자력연구소에서 개발중인 SMART는 증기발생기를 원자로 안에 내장하는 일체형원자로이다[1]. SMART의 관류식 나선형 증기발생기에 대한 개념설계가 수행되었으며 기본 설계가 진행중이다[2]. 관류식 나선형 증기발생기에서 모듈급수헤더는 모듈급수관에서 이차측 냉각수를 공급받아 각 전열관에 분배하는 공간이다. 모듈급수헤더는 티타늄합금 PT-3V로 제작되며 각 카세트당 6개씩 전체적으로 72개로 구성된다. 모듈급수헤더 덮개는 모듈급수헤더 튜브시트와 용접으로 연결되며 아래쪽 중앙부는 모듈급수관과 연결된다. 모듈급수헤더의 안에는 180℃의 이차측 냉각수가 흐르고 바깥쪽은 310℃에 해당하는 고온의 일차냉각수가 흐르고 있다. 따라서 모듈급수헤더는 원자로 내에서 심한 열구배를 받고 있으며 운전조건에 따라 다양한 열과도하중을 받는 구조물이다. 또한, 밖은 14.7MPa의 고압이 작용하고 있는데 비해 안에는 5.5MPa전후의 낮은 압력이 작용하고 있으므로 안팎의 압력차이도 매우 크다. 선행연구에서 증기발생기 전체에 대한 구조적 건전성을 보이기 위해서 모듈급수관에 대한 정적인 응력해석을 수행하였으며, ASME와 러시아의 기술기준을 이용하여 핵심치수에 대한 치수결정계산을 수행하였다[3,4]. 또한, 모듈급수헤더에 대한 열해석과 응력해석을 수행하였다[5,6]. SMART에서 증기발생기를 개발하는 과정은 3차원 모델을 작성하여 이를 이용하여 응력해석을 수행하고 응력해석값을 사용하여 피로수명을 예측함으로써 CAE개념을 바탕으로 하나의 모델에서 모든 것이 이루어지는 전략을 사용하고 있다.

본 연구에서는 이를 바탕으로 모듈급수헤더의 피로해석을 수행하고 방법적인 절차를 수립하고자 한다. ASME에는 피로해석을 수행하는 절차와 S-N곡선이 제시되어있다. 그러나 모듈급수헤더는 러시아의 기술기준 GOST에 준해 제작되는 PT-3V로서 S-N곡선이 제공되지 않는다. 따라서 별도의 실험을 통해 S-N곡선을 구하여 피로해석에서 사용하였다. 재료에 따라서 평균응력을 고려하는 모델에 따라 영향을 많이 받으므로 본 연구에서는 PT-3V재료에 대해 다양한 모델을 비교평가하였으며 실제 모듈급수헤더의 응력값에 대해서도 비교평가하였다. 이와 함께 모듈급수헤더에서 큰 응력이 작용하고 있는 튜브시트 원공주위의 최대주응력을 구하고 이를 이용하여 반복응력을 계산한 다음 허용 반복하중 수를 계산하였다.

2. 해석 방법

2. 1 응력해석

모듈급수헤더의 형상은 그림 1과 같이 같은데 튜브시트에 장착된 오리피스도 해석범위에 포함되지 않는다. 응력을 구하기 위한 유한요소해석에서 기하학적 대칭성을 고려하여 그림 2와 같이 1/4만 모델링하였다. 열해석과 응력해석은 IDEAS로 수행하였는데 I-DEAS 코드에서는 순차적으로 열해석을 한 후 응력해석을 별도로 수행해야한다. 먼저 열해석을 한 후에 그 결과와 정적해석의 경계조건을 조합하여 해석을 수행하면 열하중과 압력하중을 모두 고려한 결과를 얻을 수 있다. 응력해석에 대한 자세한 내용은 참고문헌[5,6]에 기술되어있다.

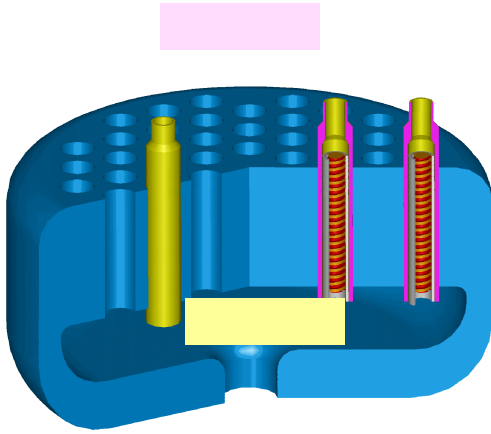


그림 1 모듈급수헤더의 형상

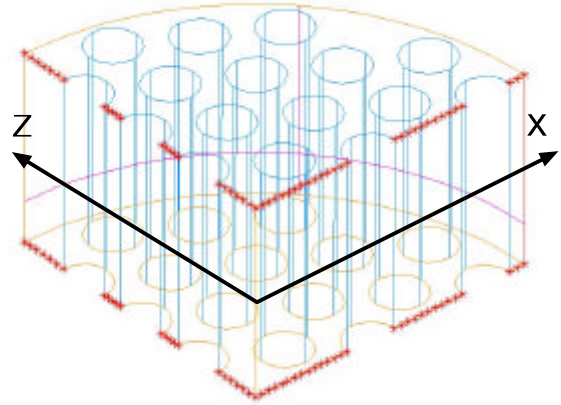


그림 2 모듈급수헤더 사분모델과 좌표축

2.2 피로해석

피로해석은 응력을 기준으로 수행하는 방법과 변형율을 이용하여 수행하는 방법이 있는데 모듈급수헤더의 경우 그림 3에서 고반복피로(high cycle fatigue)에 해당하므로 응력을 기준으로 평가하였다. 이 때 사용되는 용어의 정의는 다음과 같다.

$$\Delta s = s_{\max} - s_{\min} \quad (1-a)$$

$$s_{alt} = \frac{s_{\max} - s_{\min}}{2} \quad (1-b)$$

$$s_m = \frac{s_{\max} + s_{\min}}{2} \quad (1-c)$$

$$R = \frac{s_{\min}}{s_{\max}} \quad (1-d)$$

피로수명을 예측할 때는 반복응력의 크기(Stress amplitude)를 사용하지만 평균응력이 영향을 미친다. 피로해석에 영향을 미치는 인자는 그림 4에서 보는 것과 같이 형상, 하중, 재료가 주된 인자이며 응력을 계산하는 과정에서 형상과 하중, 그리고 재료의 영향이 고려되며, 피로해석 모델에서 피로수명선도 등으로 다시 고려된다.

현 단계에서는 피로해석을 수행할 수 있는 절차를 확립하고 모듈급수헤더에 대해 정상운전 상태에 대한 누적손상계수를 평가하였다. 모듈급수헤더의 재질인 PT-3V에 대한 S-N곡선은 그림 5와 같이 실험으로 구하여 사용하였다.

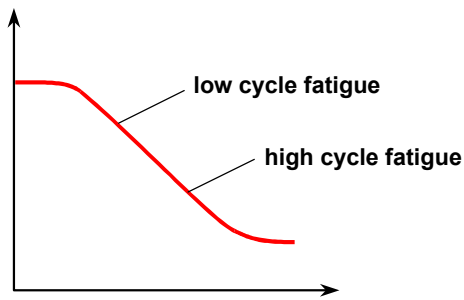


그림 3 피로파손의 범위분류

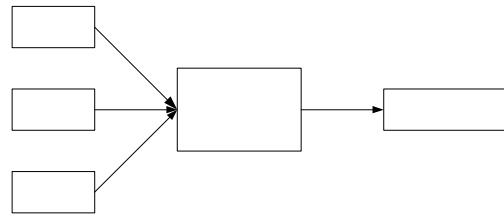


그림 4 피로해석 관련 인자

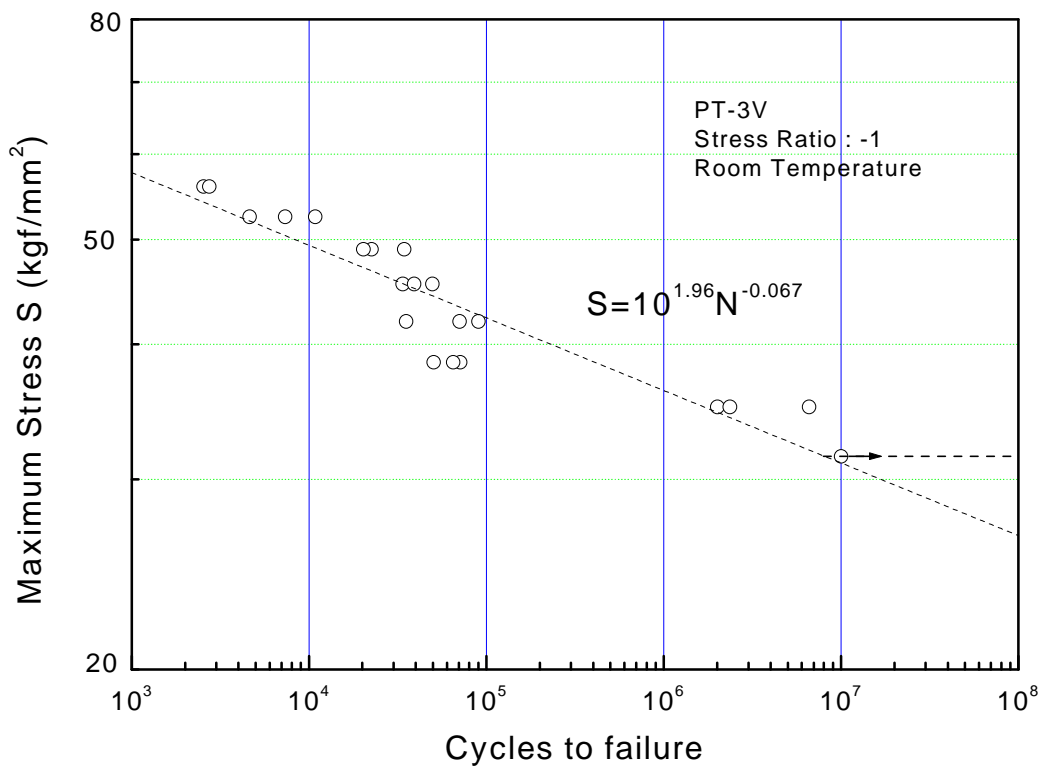


그림 5 실험으로 구한 PT-3V S-N곡선

전력기술기준[7]에 따르면 기기에 대해 지정한 운전조건이 MNB 3222.(4)의 조건에 만족하지 못할 경우, MNB 3222.4(5)에 정한 바에 따라 필요사항을 결정한다. 이 때 기기의 한 점에 발생하는 응력을 기준으로 해야 하며, 허용응력 사이클은 모든 지점에 대해서 규정된 운전조건에 대해 충족해야 한다. 설계시방서에 정한 반복운전하중으로 인한 응력차 만들 고려하면 된다.

현재는 모든 운전과도에 대해 온도 및 압력변화에 대한 결과가 생산되지 않은 단계이므로 피로 해석을 위한 절차를 작성하고 기동 및 정지에 대해 누적손상계수를 계산하였다. MNB 3222.4(4)의 조건을 만족하지 않을 경우, 기기가 피로파손을 일으키지 않고, 정해진 반복운전을 견딜 수 있는지 여

부를 규정한 바에 따라 결정해야 한다. 이 결정은 어느 한 점에서의 응력에 근거를 두고 판단해야 하며, 허용응력사이클은 모든 점에서 규정운전하중에 대해 적합해야 한다.

피로해석에 앞서 모든 정상운전조건에 대하여 MNB 3216(응력차 유도)에 따라 응력차 및 반복응력강도 S_a 를 결정한다. 이론적, 실험적 또는 광탄성에 의한 연구나 혹은 수치응력해석 기법으로 결정되는 응력집중계수를 사용하여 모든 조건 하에서 국부구조 불연속의 영향을 평가해야 한다. 여기서는 유한요소해석으로 정상상태에 대해 구한 응력을 사용하였다.

기술기준에 준해 결정한 $\Delta\sigma/2$ (ASME에서 S_{alt})에 설계피로곡선에서 구한 탄성계수와 해석에 사용한 탄성계수의 비를 곱한다. 이 값을 해당 설계피로곡선의 종축에 대입, 횡축에서 해당 사이클수를 찾는다. 이 운전사이클수가 현저한 응력변동을 발생시키는 유일한 것일 경우에 허용사이클수가 된다.

현저한 응력변동을 일으키는 응력사이클의 종류가 둘 이상일 경우 이들의 누적영향은 다음의 순서에 정한대로 평가한다.

기기의 수명기간 동안 유형 1, 2, 3, ..., n의 응력사이클이 반복되는 회수를 각각 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$ 으로 표시한다. 각 유형의 응력사이클에 대해, 반복응력강도 $S_{alt1}, S_{alt2}, S_{alt3}, \dots, S_{altn}$ MNB 3216.1 또는 MNB 3216.2의 절차에 따라 결정한다. 각 $S_{alt1}, S_{alt2}, S_{alt3}, \dots, S_{altn}$ 에 대해, 해당 설계피로곡선을 사용하여 이 유형의 응력사이클 만이 작용할 때 최대허용반복회수 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ 을 결정한다. 각 유형의 응력사이클에 대해, $U_1=n_1/N_1, U_2=n_2/N_2, U_3=n_3/N_3, \dots, U_n=n_n/N_n$ 으로부터 사용계수 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 을 계산한다. $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$ 에서 누적사용계수 U 를 계산한다. 누적사용계수 U 는 1.0을 초과하지 않아야 한다.

위의 전력기술기준의 절차는 ASME를 따르지만 영국의 BS5500과 같은 경우에는 주응력값을 그대로 사용하기도 한다[8].

2.3 평균응력 모델 비교 평가

반복하중의 크기가 동일해도 평균응력이 다르게 작용하는 경우 피로수명이 달라진다. 실제 구조물에서 평균응력이 영인 경우는 거의 없으므로 평균응력의 영향을 반드시 고려해야 한다. 먼저, 평균응력을 고려하지 않은 경우의 응력과 수명관계는 다음과 같이 표현된다. 여기서 C_f 와 b 는 실험에서 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta s}{2} = C_f (N_f)^b \quad (2)$$

평균응력을 고려하기 위해서 제안된 여러 가지 방법이 있다. 여기서는 다음과 같은 네 가지 모델을 비교 적용하였다. 먼저, Goodman의 모델은 재료의 인장강도 값에 대한 선형적인 비로 평균응력을 고려하였는데 수식적으로 다음과 같이 표현된다. S_u 는 인장강도를 나타낸다.

$$\frac{\Delta s}{2} = (S_u - s_m) \frac{C_f}{S_u} (N_f)^b \quad (3)$$

Soderberg의 모델은 재료의 항복강도 값에 대한 선형적인 비로 평균응력을 고려하였는데 수식적으로 다음과 같이 표현된다. S_y 는 인장강도를 나타낸다.

$$\frac{\Delta s}{2} = (S_y - s_m) \frac{C_f}{S_y} (N_f)^b \quad (4)$$

Gerber 방법은 Goodman과 유사하나 제곱의 항으로 고려하였다.

$$\frac{\Delta s}{2} = (S_u^2 - s_m^2) \frac{C_f}{S_u^2} (N_f)^b \quad (5)$$

Morrow 방법은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta s}{2} = (C_f - s_m)(N_f)^b \quad (6)$$

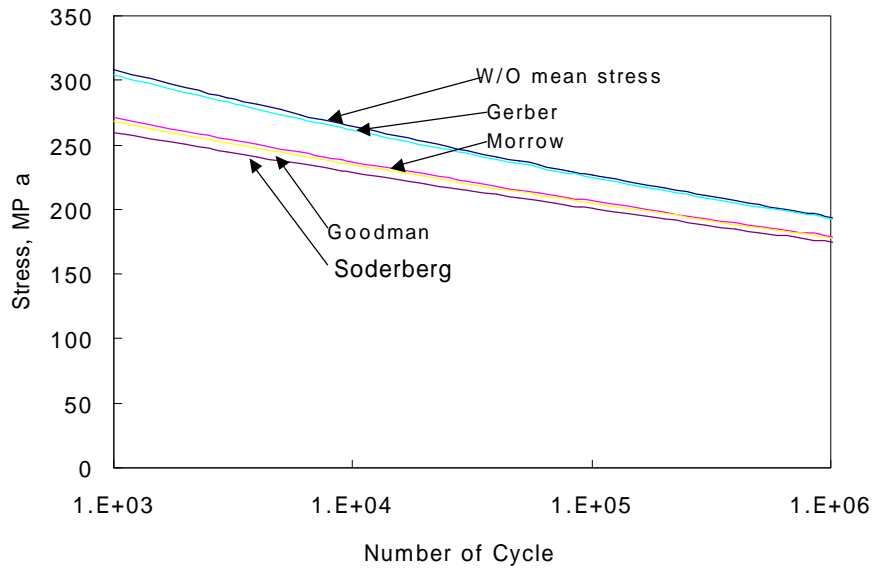


그림 6 PT-3V의 평균응력효과 비교(반복응력의 25%)

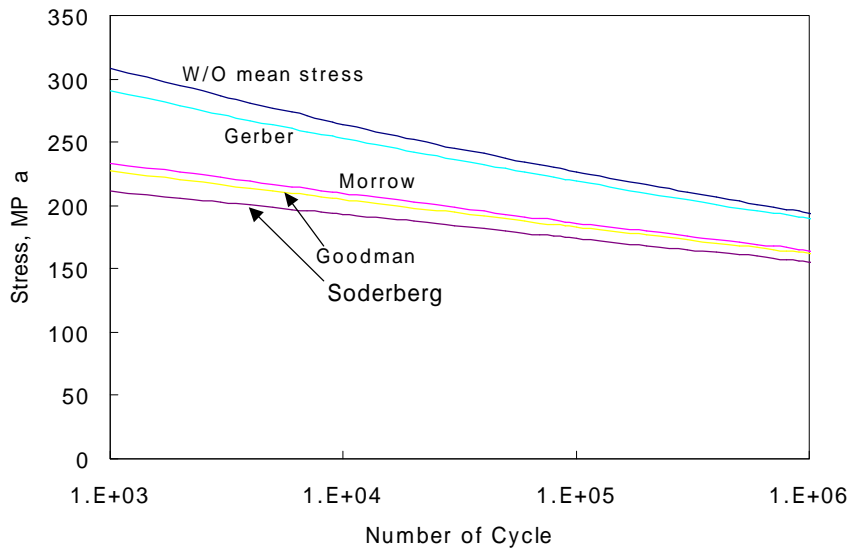


그림 7 PT-3V의 평균응력효과 비교(반복응력의 50%)

PT-3V재료의 경우 평균응력이 반복응력의 25%와 50%인 경우에 각 모델의 응력-수명선도는 가

각 그림 6 및 7과 같다. Soderberg모델이 가장 보수적인 결과를 보여 준다. 일반적으로 항복강도와 인장강도의 차이가 큰 경우에는 Soderberg모델과 Goodman모델의 차이가 크지만 값이 PT-3V와 같이 항복강도와 인장강도의 차이가 10%이내일 경우에는 그림에서 보는 것과 같이 차이가 크지 않다.

3. 모듈급수해더 피로해석결과

3.1 응력해석 결과

오리피스가 장착되는 튜브시트의 원공내부온도가 일차측 냉각재와 같다고 가정하여 얻은 결과이다. 그림 8은 튜브시트에 대한 주 응력성분의 분포를 보여준다. 이 경우는 모듈급수해더 튜브시트의 밑면에서 온도구배가 크게 생기므로 이곳에 큰 응력이 발생한다. 그림 9는 튜브시트 아랫면에서 x축에 따른 응력의 분포를 보여준다. 이 값은 x,y,z 좌표축에 따른 값으로서 피로해석에 바로 사용할 수 없으므로 3개의 주응력성분을 구해야 한다.

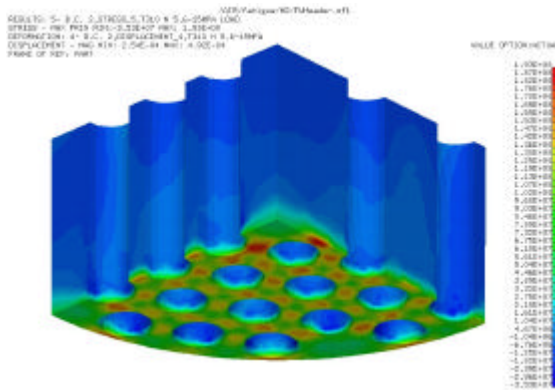


그림 8 튜브시트 아랫면 최대주응력분포

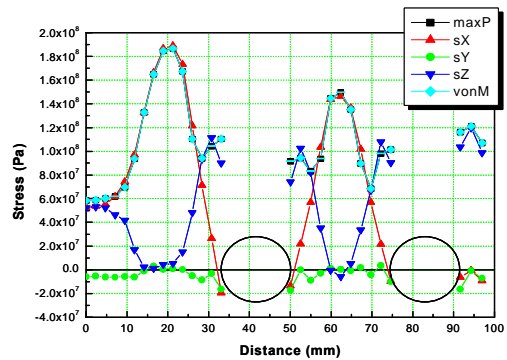


그림 9 X축 밑면의 응력분포

단순히 압력하중이 가해지는 경우에 대해서는 수식을 활용하여 응력강도를 계산하면 167.5MPa가 된다. 이 값의 절반이 반복응력에 사용되는 값인데 유한요소해석한 값과 큰 차이가 없다.

3.2 피로해석 결과

앞서 3.1에서 구한 응력 값을 주응력으로 변환한 후 다음과 같이 반복응력의 크기를 구하였다.

$$\Delta \mathbf{s} = \max\{(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2), (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3), (\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_1)\} \quad (7)$$

표 1에서는 튜브시트 밑면에서 x축을 따라 반복응력을 구한 다음에 여러 가지 모델로 각 좌표에서의 수명을 구한 것이다. 여기서 피로한도로 명기한 것은 10^7 사이클 이상으로 간주하였다. 이는 PT-3V의 S-N곡선을 구할 때 10^7 까지 실험하였기 때문이다. 표 2에서는 마찬가지로 z축을 따라 수명을 구한 값을 보여준다. 수명이 가장 낮게 평가되는 곳에서의 값을 그림 10에서 비교하였다. 평균 응력을 고려하지 않으면 12000회 이상의 반복하중이 가능하지만 평균응력을 고려한 모델에서는 가장 낮은 값이 3000회를 조금 상회한다. 실제로 다른 하중을 모두 조합해야 정확한 평가를 할 수 있지만 운전-정지관점에서는 충분한 피로수명을 갖는 것으로 평가되었다.

표 1 여러 가지 모델을 이용한 피로수명 예측(x축 밀면)

(mm)	(MPa)		Goodman	Soderberg	Gerber
0	29.3				
2.4	29.5				
4.7	30.8				
7.1	34.1				
9.4	40.1				
11.8	51.5				
14.2	68.3	2,329,715	1,023,614	953,816	2,231,753
16.5	85.7	78,751	27,852	25,456	73,597
18.9	94.7	17,740	5,601	5,067	16,332
21.3	97.2	12,024	3,678	3,318	11,021
23.6	88.7	47,123	16,049	14,618	43,826
26	63.5	6,912,670	3,222,800	3,018,807	6,660,738
28.4	52.2				
30.7	58.0				
33.1	57.9				
50.1	48.1				
52.5	51.8				
55	47.0				
57.4	53.4				
59.9	76.7	412,517	163,289	150,752	390,756
62.4	78.2	308,958	120,030	110,629	292,032
64.8	70.5	1,451,457	620,582	576,872	1,386,514
67.3	50.8				
69.7	38.0				
72.2	53.8				
74.6	51.2				
91.6	60.6				
94.3	63.2	7,418,943	3,471,649	3,252,964	7,151,066
97	54.6				

표 2 여러 가지 모델을 이용한 피로수명 예측(z축 밀면)

(mm)	(MPa)		Goodman	Soderberg	Gerber
0	29.3				
2.6	29.1				
5.2	30.4				
7.8	37.9				
10.3	43.4				
12.9	51.3				
15.5	49.3				
32.5	66.8	3,245,240	1,452,577	1,355,752	3,114,595
34.3	80.5	200,448	75,668	69,563	188,830
36	82.8	131,643	48,284	44,274	123,583
37.8	83.5	116,099	42,211	38,675	108,874
39.5	73.3	811,603	335,151	310,585	772,415
56.5	67.7	2,657,648	1,176,402	1,096,906	2,547,812
58.3	77.2	374,390	147,276	135,892	354,388
60	78.6	286,304	110,675	101,961	270,463
61.8	76.6	420,629	166,708	153,925	398,495
63.5	66.8	3,245,240	1,452,577	1,355,752	3,114,595
80.5	35.1				
83.3	40				
86	35.1				
88.8	31.1				
91.5	31.4				
94.3	34.3				
97	37.8				

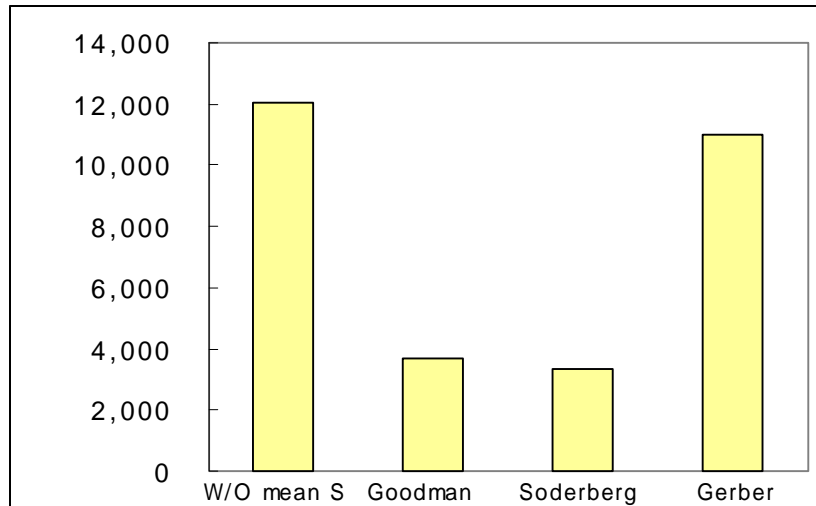


그림 10 피로해석모델에 따른 모듈급수헤더의 수명

계산된 피로수명에 대한 등고선을 그리면 모듈급수헤더에 대한 피로수명지도가 된다. ABAQUS/Safe[9]나 Durability[10]에서는 이러한 일련의 과정이 각각의 모델을 도입하여 자체적으로 계산 할 수 있도록 구성되어 있다.

5. 결론

본 연구에서는 선행연구에서 수행된 모듈급수헤더의 열응력해석결과를 바탕으로 피로평가를 수행하였다. 모듈급수헤더는 러시아 기술기준을 따르는 PT-3V티타늄 합금으로 제작되므로 PT-3V에 대해 실험으로 구한 S-N곡선을 피로해석에 사용하였다. 평균응력효과가 피로수명에 미치는 영향을 다양한 방법으로 고려하여 비교하였다. PT-3V 티타늄합금으로 설계할 경우 평균응력효과를 고려하면 Soderberg의 모델이 가장 보수적인 결과를 보였다. 응력이 크게 작용하고 있는 튜브시트부위에 대해 설계수명을 역으로 계산하여 평가한 결과 모듈급수헤더는 피로수명관점에서 안전함을 보였다. 향후 이상과 같은 방법과 절차로 SMART 증기발생기의 모든 부품에 대해 수명지도를 작성할 계획이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김용완, 외 "Analysis of Design Characteristics of Integral PWR for Advanced Reactor,(in Korean)" 한국원자력학회지, 제27권, 제2호, pp.269-279, 1995.
2. 김종인 외, *Development and Verification Test of Integral Reactor Major Components*, KAERI/RR-1889/98, 1999.
3. 김용완, 외 "Transient Thermal Stress Analysis for Module Feedwater Pipe of SMART Steam Generator," 한국원자력학회 1999추계학술대회 논문집, 포항, 1999.
4. 김용완, 외 "SMART 증기발생기 치수결정에서 ASME와 러시아 기술기준의 비교," 한국원자력학회 2000추계학술대회 논문집. 대전, 2000.
5. 김충관, 외 "Thermal and Stress Analysis of Module Feed Water Header of SMART Steam

- Generator Using Finite Element Analysis," 한국원자력학회 2000추계학술대회 논문집. 대전, 2000.
6. 김용완, 외 "I-DEAS를 이용한 SMART 증기발생기 모듈급수헤더의 열응력해석," 2000 SDRC User's Conference, 경주, 2000.
 7. 한국전력기술기준 MNB, 1995.
 8. H. Mayer, H.L. Stark, S. Ambrose, "Review of fatigue design procedure for pressure vessels," *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, Vol.77, pp.775-781, 2000.
 9. 이환수 외, "SMART 증기발생기 노즐헤더의 피로수명평가를 위한 열피로시험기의 개발" 한국원자력학회 2001추계학술발표대회 발표예정, 제주, 2001.
 10. *Introduction to ABAQUS/SAFE*, HKS.
 11. *I-DEAS Durability User's Guide*, SDRC.