

# 일차 냉각계통 스트레이너에 대한 내진 건전성 평가

## Seismic Evaluation for Strainer in the Primary Cooling System

정 철 섭\*  
Chung, Chul Sup

### 요 지

본 연구의 목적은 지진하중에 대한 응력 해석을 수행하여 ASME, Class 3 설계요건에 따라 스트레이너의 구조건전성을 평가하는 것이다. 스트레이너에 대한 설계요건이 ASME 코드 내에 명백하게 규정되어 있지 않기 때문에 본체는 밸브 설계요건인 ND-3500을 적용하고, 양쪽 플랜지 연결부는 배관 설계요건 중 ND-3658.3을 적용하였으며, 하단의 덮개 플랜지는 Appendix XI에 따라 설계 및 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 T형 스트레이너를 쉘로 모델링하여 유한요소법을 사용하여 지진하중에 의해 스트레이너가 응답하는 모드 형상 및 고유진동수를 계산하여 충분히 강건한 구조물임을 입증한 후 정적 해석을 수행하여 주관과 분기 관이 접합하는 연결부위와 같은 위험단면에서의 막응력과 굽힘 응력을 구하였다. 각 하중조합에 대해 코드에서 규정하고있는 허용 값과 비교한 결과 스트레이너는 지진하중이 작용하는 경우 구조적 건전성을 유지하고 있음을 확인하였다. 아울러 인접 배관을 연결해주는 플랜지 연결부의 응력을 규정에 따라 구한 후 설계요건에 의한 허용 값과 비교하여 건전성을 만족함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 설계요건, 유한요소법, 지진하중, 등가 정적해석, 설계기준, 구조 건전성

### Abstract

To evaluate the structural integrity for the strainer under seismic loading the seismic analysis and design were performed for T-type strainer in accordance with ASME, Section III, Class 3(ND). Since there are no specified design requirements for the strainer in ASME Code, the strainer body was analysed according to ND-3500, valve design. Flanged joints connected with PCS piping were designed according to ND-3658.3. And the criteria for the cover flange was governed by the Appendix XI. Both a frequency analysis and an equivalent static seismic analysis of the strainer were carried out using the finite element computer program, ANSYS. The frequency analysis results show the fundamental natural frequency is greater than 33Hz, thus justifying the use of the equivalent static analysis through which membrane and bending stresses are obtained in the critical points near the branch connection area. The results of the seismic evaluation fully satisfied with the structural acceptance criteria of the ASME Code. Accordingly the structural integrity on the strainer body and flanges were proved.

**Keywords** : design requirements, finite element, seismic load, equivalent static analysis, acceptance criteria, structural integrity

### 1. 서 론

지난해 9월 21일 대만에서 규모 7.3의 강진이 발

생하여 2000명 이상이 사망하고 많은 건물과 사회 기반시설이 파괴되는 지진재난이 발생하자 우리나라는 과연 지진으로부터 안전한지에 관심이 높아지고

\* 정희원 · 건양대학교 기계공학과, 부교수

· 이 논문에 대한 토론을 2000년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

있다. 기상청 자료에 따르면 우리나라는 1년에 19번 가량 지진이 발생하고 있으며 사람이 느낄 수 있는 리히터 규모 3.0 이상은 연평균 9번이다. 몇 년 전부터 학계 일부에서 경상도 일대에 활성단층이 분포하고 있다는 주장이 제기돼 "우리나라도 지진의 피해로부터 안전하지 않다"는 우려가 나오고 있다. 97년 6월 경주부근에서 일어난 규모 4.3의 지진이 양산단층의 영향 때문이었으며, 더구나 이 지역은 원자력 발전소와 포항, 울산지역 공업단지를 끼고 있어 대규모 지진이 일어날 경우 가공할 만한 피해가 우려된다. 최근 우리나라에서 원자력 발전의 의존도가 증가하는 만큼 원자력 발전소의 안전성에 대한 국민적 관심도 비례적으로 증대되고 있으므로 안전성을 확보하기 위해 원자력 관련 기기에 대하여 지진하중에 대한 구조 건전성을 확보하는 것이 중요한 과제가 되어 가고 있다.

본 연구에서 해석하려는 T형 스트레이너는 다목적 원자력 발전소인 하나로의 일차 냉각계통 펌프의 임펠라(impeller)에 손상을 주거나 핵연료를 포함한 유동관 및 판형 열 교환기에 손상을 줄 수 있는 일차 냉각계통내 이물질 제거를 위하여 2대의 펌프 흡입 관쪽에 각각 설치되어 있으며, 하나로 일차 냉각계통은 냉각수의 설계유량이 780kg/sec로서 이중 90%는 노심 냉각 관로로 흐르며 우회 관로에는 나머지 10%가 원자로 수조 바닥으로 흐른다.<sup>1)</sup> 만약, 일차 냉각계통내의 이물질을 필터링하여 냉각재를 일차 냉각계통 펌프로 보내주는 스트레이너 몸체가 지진하중에 취약하여 구조적 건전성을 상실하거나, 인접 배관

을 연결해주는 플랜지 연결부의 구조적 건전성이 상실될 경우 하나로의 안전성에 직접적인 영향을 초래할 수 있어 지진하중에 대한 구조 건전성의 확보가 무엇보다도 중요하다.

하나로 일차 냉각계통 스트레이너는 ASME, Class 3 기기로 분류되어 있으나 설계요건이 ASME 코드 내에 명백히 규정되어 있지 않아서 연결 배관계의 한 절점으로 가정하여 배관해석을 수행하여 배관 설계요건을 적용하여 간단하게 구조 건전성을 평가하였으나 실제 모델을 정확히 반영하지 못하는 단점이 있었다. 따라서, 본 연구에서는 실제 모델을 반영하기 위해 스트레이너를 연결 배관으로부터 분리시켜 모델링하여 주어진 경계조건에 대해 막 응력과 굽힘 응력을 구하여 본 연구에서 제시된 방법으로 구조 건전성을 평가하였다. 즉, 스트레이너 본체는 밸브 설계요건인 ND-3500<sup>2)</sup>을 적용하고, 배관과 플랜지 연결부는 배관 설계요건중 ND-3658.3<sup>2)</sup>을 적용하였으며, 하단의 덮개 플랜지는 Appendix X<sup>3)</sup>의 설계기준을 적용하는 밸브와 배관의 설계요건을 조합하는 방법을 사용하였다.

## 2. 스트레이너 해석모델

해석하려는 스트레이너는 여과된 냉각수를 일차 냉각계통펌프 흡입부로 보내는 14 인치 주관과 이물질을 걸러주며 배수 처리해주는 14 인치 분기관이 T형으로 연결되어 있는 SA403 WP304L로 제작된 본체와, 내부에 냉각수를 여과해주는 스크린과, 스트레

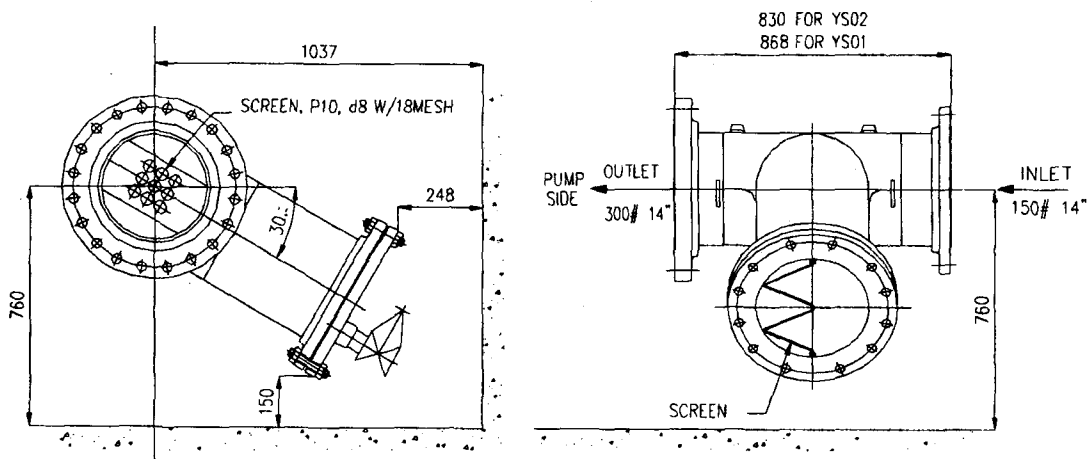


그림 1 스트레이너 구성도

표 1 스트레이너 구성품의 재질 및 재료상수

부품명	재료	항복값(Sy) ksi(MPa)		허용 응력(S) ksi(MPa)		탄성계수(E) 10 <sup>6</sup> psi(GPa)	
		100 °F	248 °F	100 °F	248 °F	100 °F	248 °F
· BODY	SA403 WP304L, FITTING	25 (172)	20.244 (139.6)	15.7 (108.2)	15.508 (106.9)	28.3 (195.1)	27.3 (188.3)
· FLANGE	SA182 F304L, FORG.	25	20.244	15.6 (107.6)	14.824 (102.2)	28.3	27.31
· PIPE (14",SCH.40) · NIPPLE	SA312 TP304L Wld & Smls Pipe	25	20.244	15.7	15.508	28.3	27.31
· ELEMENT SEAT · ELEMENT RING · RING · SCREEN HOLDER	SA240 304L, Plate	25	20.244	15.7	15.508	28.3	27.31
· S. BOLT/NUT	SA193 B7	105		25	25	28.3	27.31

이러 몸체를 1차 냉각계통 배관과 펌프 흡입 노즐 배관에 단단히 고정시켜주는 플랜지로 구성되어 있다. (그림 1 참조) 스트레이너 각 구성품의 재질 및 재료상수가 표 1에 나타나 있으며, 재질 및 적용 온도에 따라 허용 응력값이 정해진다.

스트레이너를 상용 유한요소 해석코드인 ANSYS를 이용하기 위한 모형으로 나타내기 위하여 사용된 총 절점 수는 1258개이며, 탄성 쉘요소(SHELL63)가 적용되었다. SHELL63 요소는 한 개의 요소에 4개의 절점을 가지며 각 절점당 6 자유도가 허용되는 요소이다.<sup>4)</sup>

해석에서는 주판 양단이 고정된 경계조건을 사용하였고, 주어진 경계조건에 대해 스트레이너가 응답하는 모드 형상 및 고유진동수를 구하고, 얻어진 기본 고유진동수가 33Hz보다 충분히 크면 스트레이너 구조물을 강건한(rigid) 기기라고 간주하였다. 지진하중 조건은 내진 검증요건<sup>5)</sup>에 따라 수평방향으로 6.75g, 수직방향으로 7.75g의 가속도로 전 스트레이너에 걸쳐 작용한다고 가정하고 가장 보수적인 4가지 하중조합 경우에 대하여 정적 해석을 수행하였다.

그림 2는 유한요소 해석모델과 경계조건을 보여준다.

### 3. 스트레이너 본체의 구조건전성 평가

#### 3.1 구조건전성 평가기준

스트레이너 본체에 대한 설계요건으로 밸브 설계요건인 ND-3500을 적용한다. 구조 건전성 평가를 보

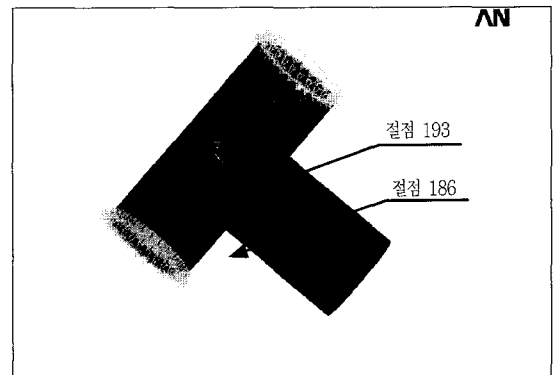


그림 2 스트레이너의 유한요소 모델과 경계조건

수적으로 수행하기 위해 운전조건 C인 하중조건에 대해 운전조건 A에 대한 허용값을 사용하였으며, 설계압력이 지진 최대압력으로 사용된다. 지진 최대 압력 및 지진 하중 하에서 구조물에 발생하는 응력수준은 다음 식(1)-식(3)들을 만족해야한다. 이때 사용되는 응력은 수직응력 성분인 주 응력이며, 절대값이 최대인 값을 취한다.

$$P_{max} \leq 1.2 P_D \quad (1)$$

$$\sigma_m \leq 1.0 S \quad (2)$$

$$\sigma_m + \sigma_b \leq 1.5 S \quad (3)$$

여기서  $P_D$  = 설계압력.

$\sigma_m$  = 일반 막 응력. 단면에 작용하는 평균응력이며, 압력과 하중에 의해 발생한다.  
 $\sigma_b$  = 굽힘 응력. 단면에 작용하는 응력의 선형 변화 분이며 압력과 하중에 의해 발생한다.  
 S = 허용응력. 운전 온도에 따라 결정된다.

### 3.2 모드 해석

모드 해석은 선형 탄성 구조물의 고유 진동수와 모드 형상을 계산하는데 사용된다. 해석에서 감쇠효과를 무시하고 질량행렬과 강성행렬이 일정한 자유진동이라 가정한다. 주관 양단이 플랜지로 강건하게 연결되어 있으므로 경계조건으로 고정 지지조건을 사용하였다. 무감쇠, 자유 진동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.<sup>5)</sup>

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (4)$$

여기서,  $[M]$ 과  $[K]$ 는 각각 질량행렬 및 강성행렬이며,  $\{u\}$ 는 변위 벡터이다. 선형 구조물에 대하여 변위 벡터가 다음과 같은 조화운동 ( $u = \{u_0\} \cos \omega t$ ) 을 갖는다고 가정하고, 지배방정식 (4)에 대입하면 다음 고유치 방정식을 얻는다.

$$([K] - \omega^2 [M_0]) \{u_0\} = \{0\} \quad (5)$$

무용해를 얻기 위해 계수행렬의 행렬식이 0이 되어야하므로 n차의 다항식 (6)을 얻는다. 따라서, 고유치 계산은 n차 다항식을 반복법을 사용하여 구한다.

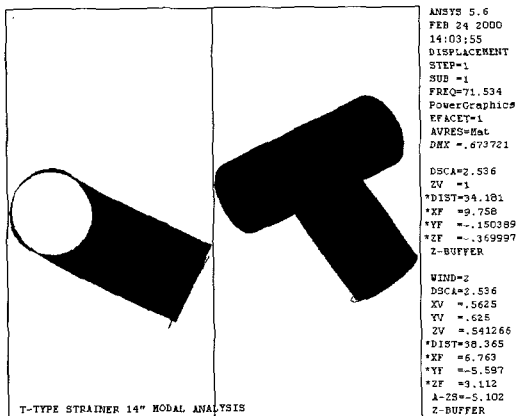


그림 3 스트레이너의 제 1차 모드 형상

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (6)$$

ANSYS에서 Householder(reduced) 방법으로 모우드를 추출하였으며<sup>4),6),7)</sup> 그림 3은 1차 모우드형상을 나타낸 것이다. 1차 모우드는 빔(beam) 모우드이며 고차 모우드에서는 쉘모드가 나타난다. 모드해석에 의해 산정된 스트레이너의 기본 고유진동수는 71.7, 72.9, 207, 344, 538Hz이며, 이는 강건한(rigid) 범위의 하한 값인 33Hz를 초과하므로 스트레이너를 강건한 기기로 분류할 수 있어 지진하중에 대해 등가 정적해석이 가능하다.

### 3.3 등가 정적 해석

설계지진으로 표시되는 설계 가진에 따라 반응하는 구조물의 동적 응답을 구하기 위해 내진 해석이 사용된다. 구하려는 응답은 1차해인 변위 및 2차해인 응력, 하중 및 모멘트이다. 이들 지진하중에 의한 응력은 지중하중에 의한 응력과 조합되며 허용 응력과 비교한다. 등가 정적해석은 비교적 간단한 구조물에 지진하중이 작용하며, 고유진동수 해석에서 구한 기본 진동수가 33Hz를 초과하는 경우 구조 건전성을 평가하는 데 사용한다. 본 해석에서는 내진 검증요건<sup>5)</sup>에 따라 지진하중이 수평방향으로 6.75g, 수직방향으로 7.75g의 가속도로 전 스트레이너에 걸쳐 작용한다고 가정하였다. 또한 지진하중의 방향성을 고려하여 표 2와 같이 4 가지 하중조합에 대해 해석을 수행하였다. 앞 절(3.1) 건전성 평가 기준식 (2),(3)에 사용되는 일반 막 응력( $\sigma_m$ )과 굽힘 응력( $\sigma_b$ )은 ANSYS 후처리 기능에서 구한 최대 주응력을 위치에 따라 분류하여 사용할 수 있다. 일반 막 응력( $\sigma_m$ )은 중립축 위치에서의 최대 주응력을 택하며, 일반 막 응력( $\sigma_m$ )과 굽힘 응력( $\sigma_b$ )의 합인 전 응력은 상단 및 하단 값 중에서 최대 주응력값을 택하였다.

최대 일반 막 응력( $\sigma_m$ )은 표 3에서 보여주고 있는 3번째 하중조합의 경우에 발생하며 최대 값은 14,679psi (101.2MPa)이고 주관과 분기 관의 연결부위와 같은 위험 단면에서 발생하고 있다.

일반 막 응력( $\sigma_m$ )과 굽힘 응력( $\sigma_b$ )의 합인 전 응력은 표 4 에서와 같이 2번째 하중조합의 경우에 가장 크며 최대 값은 19,870psi(137.0MPa)이고 주관과 분기 관의 연결부위와 같은 위험단면에서 발생하고 있다.

표 2 지진하중 조합

Load Case	Seismic Coeff.(6.75 or 7.75) ×g(386.4(9.8) (in/sec <sup>2</sup> (m/s <sup>2</sup> )))			Internal pressure, psi(MPa)
	X	Y	Z	
1	+2,608 (+66.15)	-2,994 (-75.95)	+2,608 (+66.15)	145 (1.0)
2	+2,608 (+66.15)	-2,994 (-75.95)	-2,608 (-66.15)	145 (1.0)
3	-2,608 (-66.15)	-2,994 (-75.95)	+2,608 (+66.15)	145 (1.0)
4	-2,608 (-66.15)	-2,994 (-75.95)	-2,608 (-66.15)	145 (1.0)

표 3 지진하중에 대한 막 응력 평가

Load Case	Node #	Maximum stress, psi (MPa)	Allowable stress, psi (MPa)
1	186	13,000 (89.6)	15,508 (106.9)
2	615	12,890 (88.9)	15,508 (106.9)
3	186	14,679 (101.2)	15,508 (106.9)
4	615	14,606 (100.7)	15,508 (106.9)

그림 4는 각 하중 조합에서 구한 최대 주응력에 관한 응력 등고선을 보여준다. 막 응력과 굽힘 응력을 사용하여 앞의 3.1절에 제시된 평가기준에 따라 구조 건전성을 평가하였다.

표 3과 표 4는 지진하중에 대한 정적 해석결과를 정리한 것이다. 해석결과 스트레이너에 작용하는 응력은 코드에서 규정하는 허용값 이내에 있으므로 지진하중에 대해 스트레이너 구조물은 구조적 건전성을 유지할 수 있을 것으로 평가된다.

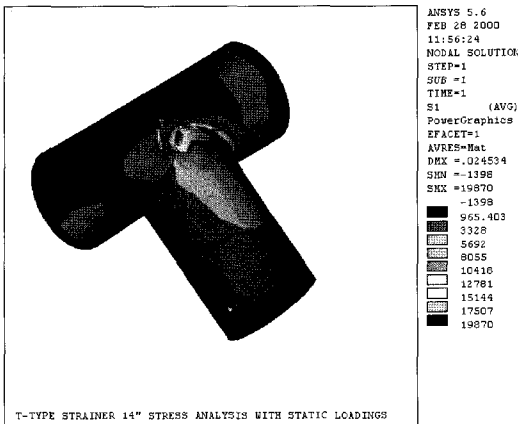


그림 4 지진하중에 대한 전 응력 등고선 (Case #2)

#### 4. 플랜지 연결부의 구조건전성 평가

##### 4.1 구조건전성 평가 기준

연결 배관에 대한 영향을 고려하기 위하여 양쪽 플랜지 연결부에 대한 설계요건으로 배관 설계요건 중 ND-3658.3<sup>2)</sup>을 적용하였다. 각 운전조건에서 배관 연결부에 작용하는 모멘트는 운전조건에 따른 다음 식((7)-(10))들을 만족해야한다.

##### 4.1.1 설계 및 운전조건 A/B

$$M_{fs} \leq 3125 \left( \frac{S_y}{36} \right) C A_b \quad (7)$$

표 4 지진하중에 대한 전 응력(막 응력+굽힘 응력) 평가

Load Case	Node #	Maximum Stress psi(MPa)	Allowable stress, psi(MPa)
1	626	19,452 (134.1)	23,262 (160.4)
2	193	19,870 (137.0)	23,262 (160.4)
3	186	18,895 (130.3)	23,262 (160.4)
4	615	18,880 (130.2)	23,262 (160.4)

$$M_{fd} \leq 6250 \left( \frac{S_y}{36} \right) C A_b \quad (8)$$

여기서,  
 $M_{fs}$  = 배관의 자중, 열팽창 및 지속적 기계적 하중에 의해 연결부에 작용하는 정적 모멘트  
 $S_y$  = 설계온도에서의 플랜지 재료의 항복강도 [(20.244ksi (139.6MPa))].  
 $C$  = 볼트 피치원의 직경 [20.25in (0.514m)]  
 $A_b$  = 볼트 뿌리부의 단면적 [14.77in<sup>2</sup> (0.009953m<sup>2</sup>)]  
 $M_{fd}$  = 자중, 배관의 열팽창 및 지속적인 기계적 하중뿐만 아니라 동적 하중에 의해 연결부에 작용하는 동적 모멘트 즉  $M_{fs}$ 에 동적 하중에 의한 모멘트를 합산한다.

#### 4.1.2 운전 조건 C

$$P_0 \leq 1.5P_D \quad (9)$$

$$M_{fd} \leq \left[ 11250 A_b - \left( \frac{\pi}{16} \right) D_f^2 P_{fd} \right] C \left( \frac{S_y}{36} \right) \quad (10)$$

여기서,  
 $P_0$  = 운전조건 C에서의 최대 운전 압력  
 $P_D$  = 설계압력 [145psi (1.0MPa)]  
 $D_f$  = 플랜지의 상승 면(raised face)의 외경 [16.25in (0.413m)]  
 $P_{fd}$  = 동적 모멘트( $M_{fd}$ )에 대한 허용값을 계산할 때 필요한 플랜지 압력

### 4.2 플랜지 조인트의 응력해석

인접 배관과 연결되어 있는 플랜지 연결부는 배관 설계요건 중 ND-3658.3<sup>2)</sup>에 따라 해석한다. 본 코드는 ANSI B16.5에 규정된 플랜지, 볼트 및 가스켓을 사용하며, 100°F에서의 허용응력이 20,000psi (137.9MPa)를 넘지 않는 볼트 재료를 갖는 경우에 적용된다

#### 4.2.1 플랜지 압력(Pfd)

배관 설계요건 ND-3658.1, para.(a)<sup>2)</sup> 규정된

플랜지 압력을 다음과 같이 구하여 식(10)에 사용한다.

$$P_{eq} = 8M_{fd} / \pi G^3 \quad (11)$$

$$P_{fd} = P + P_{eq} \quad (12)$$

여기서,  
 $P$  = 설계압력 또는 운전조건에 따른 압력  
 $P_{eq}$  = 등가 압력  
 $P_{fd}$  = 플랜지 압력  
 $G$  = 플랜지 가스켓 반력 위치에서의 직경 [15.64in (0.108m)]

#### 4.2.2 내부 모멘트

ANSYS에 의해 수행된 정적 해석에 의해 4가지 하중조건에 따라 플랜지 조인트 연결부에서는 각 방향 내부하중 3개 ( $F_x, F_y, F_z$ )와 내부 모멘트 3개 ( $M_x, M_y, M_z$ ) 총 6개의 하중 성분을 표 5, 6에서와 같이 얻을 수 있다. 보수적인 설계를 위해 4가지 동적 하중조건에서 얻은 각 하중 성분 중 절대값이 가장 큰 성분을 사용하여 식(7), (8), (10)에 사용되는 모멘트 ( $M_{fs}, M_{fd}$ )를 아래와 같이 구하였다. X, Y 방향은 단면과 평행한 방향이며, Z 방향은 단면에 수직 방향이다. 즉 X, Y방향 하중은 전단하중 또는 굽힘 모멘트를 나타내고, Z방향 하중은 축방향 하중 또는 비틀림 모멘트를 나타낸다.

$$M_A = \sqrt{M_{Ax}^2 + M_{Ay}^2} \text{ 또는 } M_{Az}$$

$$M_B = \sqrt{M_{Bx}^2 + M_{By}^2} \text{ 또는 } M_{Bz}$$

$$M_{fs} = M_A + M_B$$

$M_A$  = 플랜지 연결 배관의 자중에 의해 연결부에 작용하는 굽힘 모멘트 또는 비틀림 모멘트

$M_B$  = 플랜지 연결 배관의 열팽창에 의한 연결부에 작용하는 굽힘 모멘트 또는 비틀림 모멘트 배관 관련 코드식 (ND-3653.2의 식(10))에서 허용값의 50%를 택하여 배관 설계하중으로 제공한다.

$$M_D = \sqrt{M_{Dx}^2 + M_{Dy}^2} \text{ 또는 } M_{Dz}$$

$$M_{fd} = M_A + M_B + M_D$$

$M_D$  = 동적 하중에 의한 연결부의 굽힘 모멘트 또는 비틀림 모멘트

표 5 지진하중에 의한 입구 플랜지 연결부에서 내부 하중 및 모멘트

Load Case Internal Force	CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
Fx, lb (N)	1,729 (7,690)	-12,264 (-54,552)	12,265 (54,557)	-1,728 (-7,686)
Fy, lb (N)	-10,035 (-44,638)	-1,958 (-8,710)	-10,067 (-44,780)	-1,990 (-8,852)
Fz, lb (N)	-23,573 (-104,857)	-12,947 (-57,591)	-20,908 (-93,003)	-10,282 (-45,736)
Mx, in-lb (N-m)	150,167 (16,966)	64,695 (7,309)	124,307 (14,044)	38,835 (4,388)
My, in-lb (N-m)	40,294 (4,552)	-108,325 (-12,239)	142,792 (-16,133)	-5,828 (-658)
Mz, in-lb (N-m)	-129,126 (-14,589)	-129,177 (-14,594)	-42,553 (-4,808)	-42,604 (-4,813)

표 6 지진하중에 의한 출구 플랜지 연결부에서 내부 하중 및 모멘트

Load Case Internal Force	CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
Fx, lb (N)	-1,2881 (-57,297)	1,113 (4,951)	-1,113 (-4,951)	12,881 (57,298)
Fy, lb (N)	-2,768 (-12,313)	-10,845 (-48,241)	-2,736 (-12,170)	-10,813 (-48,098)
Fz, lb (N)	12,421 (55,251)	24,099 (107,197)	9,756 (43,397)	21,434 (95,343)
Mx, in-lb (N-m)	-77,481 (-8,754)	-163,754 (-18,501)	-51,621 (-5,832)	-137,894 (-15,579)
My, in-lb (N-m)	119,925 (-13,549)	-28,924 (-3,268)	-5,542 (-626)	-154,391 (-17,443)
Mz, in-lb (N-m)	-12,751 (-1,441)	-127,461 (-14,401)	-42,343 (-4,784)	-42,292 (-4,778)

각 운전조건에 따라 앞의 4.1절에 제시된 평가기준에 따라 구조 건전성을 평가하였다. 먼저, 입구 플랜지의 경우 운전조건 A, B에서 구한 정적 모멘트( $M_{fs}$ )는 224,989 in·lb(25,419 N·m)이며 허용값 232,061 in·lb(26,218 N·m)이내에 있으며 또한 동적 모멘트( $M_{fd}$ )는 432,209 in·lb(48,831 N·m)이어서 허용값 464,123 in·lb(52,437 N·m)이내에 있다. 운전조건 C에서 구한 동적 모멘트( $M_{fs}$ )는 432,209 in·lb이며 허용값 598,829 in·lb(67,656 N·m)이내에 있다. 출구 플랜지의 경우 운전조건 A, B에서 구한 정적 모멘트( $M_{fs}$ )는 499,661 in·lb(56,452 N·m)이며 허용값 525,592 in·lb(59,382 N·m)이내에 있으며 또한 동적 모멘트( $M_{fd}$ )는 724,722 in·lb(81,880 N·m)이어서 허용값 1,051,185 in·lb(118,764 N·m)이내에

있다. 운전조건 C에서 구한 동적 모멘트( $M_{fd}$ )는 724,722 in·lb이며 허용값 1,051,185 in·lb이내에 있다. 해석결과 플랜지 연결부에 발생하는 정적 및 동적 모멘트는 평가 기준식에서 규정하는 허용값이내에 있으므로 지진하중에 대해 플랜지 연결부는 구조적 건전성을 유지할 수 있다고 평가할 수 있다.

## 5. 덮개 플랜지의 구조 건전성 평가

### 5.1 구조 건전성 평가기준

스트레이너 분기관의 바닥을 덮어주는 덮개 플랜지는 ASME Code Appendix XI-3250<sup>3)</sup>에 따라 다음 설계 요건을 만족해야한다.

$$S_H \leq 1.5S_f \quad (13)$$

$$S_R \leq S_f \quad (14)$$

$$S_T \leq S_f \quad (15)$$

$$(S_H + S_R)/2 \leq S_f \quad (16)$$

$$(S_H + S_T)/2 \leq S_f \quad (17)$$

$S_H$  = 길이방향 허브 응력  
 $S_R$  = 반경방향 응력  
 $S_T$  = 접선방향 응력  
 $S_f$  = 설계온도 또는 가스켓 부착 온도에서의 플랜지 재료의 허용 설계응력

### 5.2 플랜지 모멘트

플랜지에 작용하는 하중에 의한 모멘트는 작용하중과 모멘트 아암과의 곱으로 표시된다.

모멘트 아암은 볼트의 피치원 중심으로부터 모멘트를 발생시키는 하중 작용선과의 상대위치에 의해 결정된다. 즉  $M_D = H_D \times h_D$ ,  $M_G = H_G \times h_G$ ,  $M_T = H_T \times h_T$  이다. 설계조건의 경우 플랜지에 작용하는 전체 모멘트( $M_0$ )는 플랜지에 작용하는 하중이  $H_D$ ,  $H_G$ ,  $H_T$ 이므로 이들 하중에 의해 발생하는 모멘트  $M_D$ ,  $M_G$ ,  $M_T$ 의 합이다. 가스켓 설치 조건의 경우 전체 모멘트( $M_0$ )는  $W \frac{(C-G)}{2}$  이다.

### 5.3 플랜지 응력

설계조건과 가스켓 설치조건에서의 플랜지 응력이 코드<sup>3)</sup>에 따라 계산된다. 길이방향 허브 응력( $S_H$ ), 반경방향 응력( $S_R$ ), 및 접선방향응력( $S_T$ )은 다음과 같이 구한다.

$$S_H = \frac{fM_0}{Lg_1^2 B} \quad (18)$$

$$S_R = \frac{(1.33te + 1)M_0}{Ll^2 B} \quad (19)$$

$$S_T = \frac{YM_0}{l^2 B} - ZS_R \quad (20)$$

여기서 e, L 및 Z는 코드<sup>3)</sup>(XI-3130 및 Fig. XI-3240-1)에 규정된 인수(factor)이다.

앞의 5.1절에 제시된 평가 기준에 따라 덮개 플랜지의 구조 건전성을 평가하였다. 먼저, 설계조건에서 구한 길이방향 허브 응력( $S_H$ )는 5248psi (36MPa)이며 허용값 22236psi (153MPa) 이내에 있고, 반경방향 응력( $S_R$ )은 4062psi(28MPa)이며 허용값 14824psi(102MPa)이내에 있으며, 접선방향 응력( $S_T$ )은 4900psi(34MPa)이며 허용값 14824psi(102MPa)이내에 있다. 또한 조합응력  $\left(\frac{S_H + S_R}{2}\right)$ 은 4655psi (32MPa)이며 허용값 14824psi(102MPa) 이내에 있고, 조합응력  $\left(\frac{S_H + S_T}{2}\right)$ 은 5074psi(35MPa)이며 허용값 14824psi (102MPa) 이내에 있다. 끝으로 가스켓 설치 조건의 경우에도 길이방향 허브 응력( $S_H$ )는 14179psi(98MPa)이며 허용값 23400psi(161MPa)이내에 있고, 반경방향 응력( $S_R$ )은 12489psi(86MPa)이며 허용값 15600psi(108MPa)이내에 있으며, 접선방향응력( $S_T$ )은 15066psi(104MPa)이며 허용값 15600psi(106MPa) 이내에 있다. 또한 조합응력  $\left(\frac{S_H + S_R}{2}\right)$ 은 13334psi(92MPa)이며 허용값 15600psi (106MPa) 이내에 있고, 조합응력  $\left(\frac{S_H + S_T}{2}\right)$ 은 14623psi (101MPa)이며 허용값 15600psi(108MPa) 이내에 있다. 해석결과 플랜지 응력은 평가 기준식에서 규정하는 허용값 이내에 있으므로 지진하중에 대해 덮개 플랜지는 구조적 건전성을 유지할 수 있다고 평가할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서 스트레이너 본체는 밸브 설계요건인 ND-3500을 적용하고, 배관과 플랜지 연결부는 배관 설계요건중 ND-3658.3을 적용하였으며, 하단의 덮개 플랜지는 Appendix XI의 설계기준을 적용하는 밸브와 배관의 설계요건을 조합하는 방법을 사용하여 하나로(HANARO)의 1차 냉각계통 스트레이너에 대한 내진 구조건전성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



- 1) 지진하중에 의해 스트레이너 구조물에 발생하는 응력 수준은 코드에 규정한 허용값 이내에 있으므로 구조적 건전성을 유지할 수 있다고 평가할 수 있다.
- 2) 양단 플랜지와 분기관 하단의 덮개 플랜지는 설계 요건을 모두 만족하고 있으므로 구조적으로 건전하다고 판단된다.

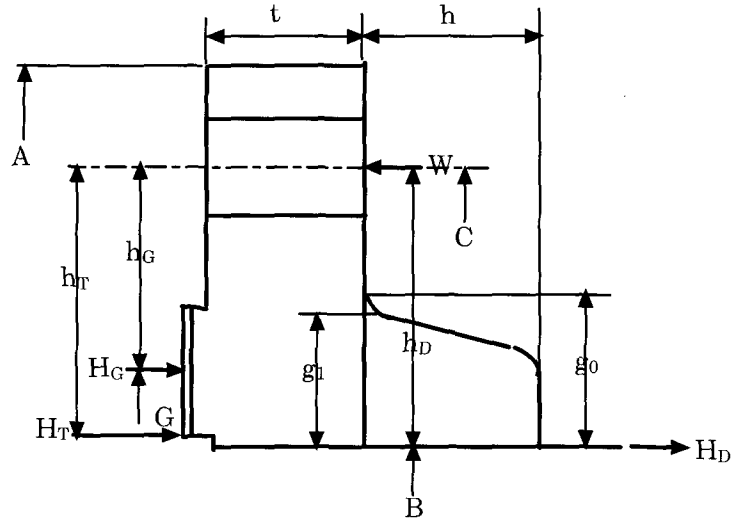
#### 감사의 글

원고에 대하여 조언을 주신 한국 원자력 연구소의 류정수 박사께 감사의 뜻을 표한다.

#### 참고 문헌

1. 김동훈, 하나로 안전 분석보고서, KAERI/TR-710/96, 한국원자력연구소, 1996, p.525
2. ASME Section III, Division I, Subsection ND, 1983 Edition thru Addenda
3. ASME Section III, Division 1, Appendix XI, 1983 Edition thru Addenda, 1983
4. ANSYS 5.4, User's Manual, 1998, p.570
5. KMRR 기술규격서, KM-300-DT-P005, 한국원자력연구소, 1996
6. R. W. Clough, *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1975, p.250
7. Sunh Choi, KyeongHoon Jeong, TaeWan Kim, KangSoo Kim, and KeunBae Park, "Free Vibration Analysis of Perforated Plates Using Equivalent Elastic Properties", *Journal of the Koorean Nuclear Society*, Vol. 30, No. 5, pp.416~423, 1998  
(접수일자 : 1999. 9. 7)
1. 김동훈, 하나로 안전 분석보고서, KAERI/TR-710/96,

부록 플랜지 용어



- A = 플랜지 외경 (21in)
- B = 플랜지 내경 (14.14in)
- C = 볼트 피치원 직경 (18.75in)
- $g_0$  = 플랜지 전면에서의 허브의 두께 (0.805in)
- $g_1$  = 플랜지 배면에서의 허브의 두께 (0.805in)
- h = 플랜지 허브의 길이 (0.87in)
- t = 플랜지의 두께 (1.375in)
- G = 가스켓 반력 위치에서의 직경 (15.64in)
- P = 설계압력 (145psi)
- H = 총 정수력 (Total Hydrostatic End Force)  
 $= 0.785 G^2 P$
- W = 플랜지 볼트 하중
- $H_D$  = 정수력 (Hydrostatic End Force)  
 $= 0.785 B^2 P$
- $H_G$  = 가스켓 하중 =  $W - H$
- $H_T = H - H_D$
- $h_D$  = 볼트 피치원 중심에서  $H_D$  작용선까지의 거리 (2.305in)
- $h_G$  = 볼트 피치원 중심에서  $H_G$  작용선까지의 거리 (1.556in)
- $h_T$  = 볼트 피치원 중심에서  $H_T$  작용선까지의 거리 (1.931in)