

## 하나로 일차냉각계통 스트레이너에 대한 내진건전성 평가 Seismic Evaluation for Strainer in HANARO Primary Collong System

류정수

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

정철섭

건양대학교  
충남 논산시 내동 산 30

### 요 약

하나로 일차냉각계통에 이물질 제거를 위하여 strainer를 설치하게 되었다. 본 연구의 목적은 ASME, Class 3 설계요건에 따라 응력해석을 수행하여 스트레이너의 구조건전성을 평가하는 것이다. 스트레이너에 대한 설계요건이 불행하게도 ASME 코드내에 규정되어 있지 않기 때문에 본체는 밸브 설계요건인 ND-3500을 적용하고, 양쪽 플랜지 연결부는 배관설계요건중 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 분기관이 접합하는 연결부위와 같은 위험단면에서의 막응력과 굽힘응력을 구하였다. 각 하중조합에 대해 코드에서 규정하고 있는 허용값과 비교한 결과 스트레이너는 지진하중이 작용하는 경우 구조적 건전성을 유지하고 있음을 확인하였다. 아울러 인접 배관을 연결해주는 플랜지 연결부의 응력을 규정 에 따라 구한 후 설계요건에 의한 허용값과 비교하여 건전성을 만족함을 알 수 있었다.

### Abstract

The seismic analysis and design were performed for T-type strainer in accordance with ASME, Section III, Class 3(ND). Since unfortunately there is no requirements for the strainer in ASME, 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 33 Hz, thus justifying the use of the equivalent static analysis. The seismic loads used in this analysis are 6.75g's in each of the horizontal direction respectively and 7.75g's in the vertical direction. The results of the seismic analysis and design were fully satisfied with the structural acceptance criteria of the ASME. Accordingly the structural integrity on the strainer body and flanges were proved.

## 1. 서 론

하나로 일차냉각계통은 냉각수의 설계유량이 780 kg/sec로서 이중 90 %는 노심 냉각관로로 흐르며 우회관로에는 나머지 10 %가 원자로 수조 바닥으로 흐른다. [1] 하나로에 설치되는 T형 스트레이너는 일차냉각계통 펌프의 임펠러(impeller)에 손상이나 핵연료를 포함한 유동관 및 판형 열교환기에 손상을 줄 수 있는 일차냉각계통내 이물질을 제거하기 위하여 2대의 펌프 흡입관쪽에 각각 설치되어 있다.

최근 우리나라는 전기 생산량의 많은 부분을 원자력 발전에 의존하고 있으나 원자력 발전의 안전성에 대한 막연한 불안감 때문에 국민들에게 전폭적인 지지를 받지 못하고 있는 실정이다. 이에 따른 안전성을 확보하기 위해 원자력 관련 기기에 대하여 지진하중에 대한 보수적인 검증을 요구하고 있다. 따라서, 냉각재를 필터링하여 냉각펌프로 보내주는 스트레이너가 지진하중에 취약하여 구조적 건전성을 상실하면 엄청난 피해를 초래할 수 있어 지진하중에 대한 구조 건전성의 확보가 무엇보다도 중요하다.

하나로 일차냉각계통 스트레이너는 ASME, Class 3 기기로 분류되어 있으나 불행하게도 설계요구조건이 ASME 코드내에 규정되어 있지 않다. 따라서 부분적으로 밸브와 배관의 설계요건을 조합하여 구조건전성을 평가하였다. 스트레이너 본체는 밸브 설계요건인 ND-3500 [2]을 적용하고, 배관과 플랜지 연결부는 배관설계요건중 ND-3658.3[2]을 적용하였으며, 하단의 덮개 플랜지는 Appendix XI[3]에 따라 설계 및 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 스트레이너 구조물의 건전성을 확인하기 위해 T 형 스트레이너를 원통형 쉘로 모델링하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 주어진 경계조건에 대해 스트레이너가 응답하는 모우드 형상 및 고유진동수를 구하였다. 얻어진 기본 고유진동수가 33 Hz보다 충분히 크면 스트레이너 구조물을 강건한(rigid) 기기라고 간주하여 지진하중에 대한 등가정적해석을 수행할 수 있다. 등가정적해석 결과로부터 주관과 분기관이 접합하는 연결부위와 같은 위험단면에서의 막응력과 굽힘응력을 구하여 각 하중조건 대해 코드에서 규정하고 있는 허용값과 비교하여 T형 스트레이너의 구조 건전성을 평가하였다. 아울러 인접 배관을 연결해주는 플랜지 연결부와 하부의 덮개 플랜지에 대해서도 응력을 규격에 따라 구한 후 설계요건에 의한 허용값과 비교하였다.

## 2. 스트레이너의 해석모델

본 연구에서는 상용유한요소 해석코드인 ANSYS 5.4 [4]를 사용하여 연구하였다. ASME, Class 3 기기인 T형 스트레이너는 일차냉각계통 냉각수를 여과시켜 냉각펌프 흡입부로 보내주는 역할을 한다. 따라서 지진하중에 대해 구조건전성을 유지해야만 냉각재 상실사고를 방지할 수 있다. 스트레이너는 여과된 냉각수를 펌프 흡입부로 보내는 14 인치 주관과 이물질을 걸러주며 배수처리해주는 14 인치 분기관이 T형으로 연결되어 있는 SA403 WP304L로 제작된 몸체와, 내부에 냉각수를 여과해주는 스크린과, 스트레이너 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, 이들 값에 따라 코드에서 정한 허용 응력값이 정해진다.

스트레이너를 유한요소해석을 위한 모형으로 나타내기 위하여 사용된 총 절점수는 1258개이며, 사용된 요소는 탄성 쉘요소(SHELL63)를 사용하였다. SHELL63 요소는 한 개의 요소

에 4개의 절점을 가지며 각 절점당 6 자유도가 허용되는 요소이다. 해석에서는 주관 양단이 고정된 경계조건을 사용하였고, 주어진 경계조건에 대해 스트레이너가 응답하는 모드 형상 및 고유진동수를 구하고, 얻어진 기본 고유진동수가 33 Hz보다 충분히 크면 스트레이너 구조물을 강건한(rigid) 기기라고 간주한다. 지진하중 조건은 수평방향으로 6.75 g, 수직방향으로 7.75 g 의 가속도로 전 스트레이너에 걸쳐 작용한다고 가정하고 가장 보수적인 4가지 하중조합 경우에 대하여 등가정적해석을 수행하였다. 그림 2는 유한요소 해석모델과 경계조건을 보여준다.

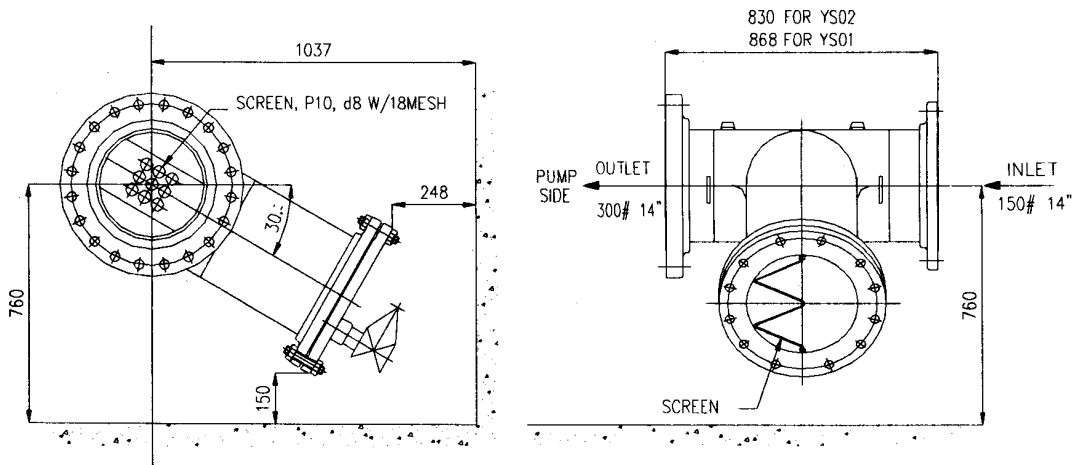


그림 1 스트레이너 구성도

표 1. 스트레이너 구성품의 재질 및 재료상수

PART DESCRIPTION	MATERIAL	YIELD STRENGTH Sy(ksi) FOR MAT'L TEMP		ALLOWABLE STRESS S(ksi) FOR MAT'L TEMP		MODULUS OF ELASTICITY E(X 10 <sup>6</sup> psi)		POISSON'S RATIO
		100 F	248 F	100 F	248 F	100 F	248 F	
▪ BODY	SA403 WP304L, FITTING	25	20.244	15.7	15.508	28.3	27.31	0.3
▪ FLANGE (SHELL, COVER)	SA182 F304L, FORG.	25	20.244	15.6	14.824	28.3	27.31	0.3
▪ PIPE(14",SCH.40) ▪ NIPPLE	SA312 TP304L Wid&Smls Pipe	25	20.244	15.7	15.508	28.3	27.31	0.3
▪ ELEMENT SEAT ▪ ELEMENT RING ▪ RING ▪ SCREEN HOLDER	SA240 304L, Plate	25	20.244	15.7	15.508	28.3	27.31	0.3
▪ S. BOLT/ NUT	SA193 B7	105		25	25	28.3	27.31	0.3

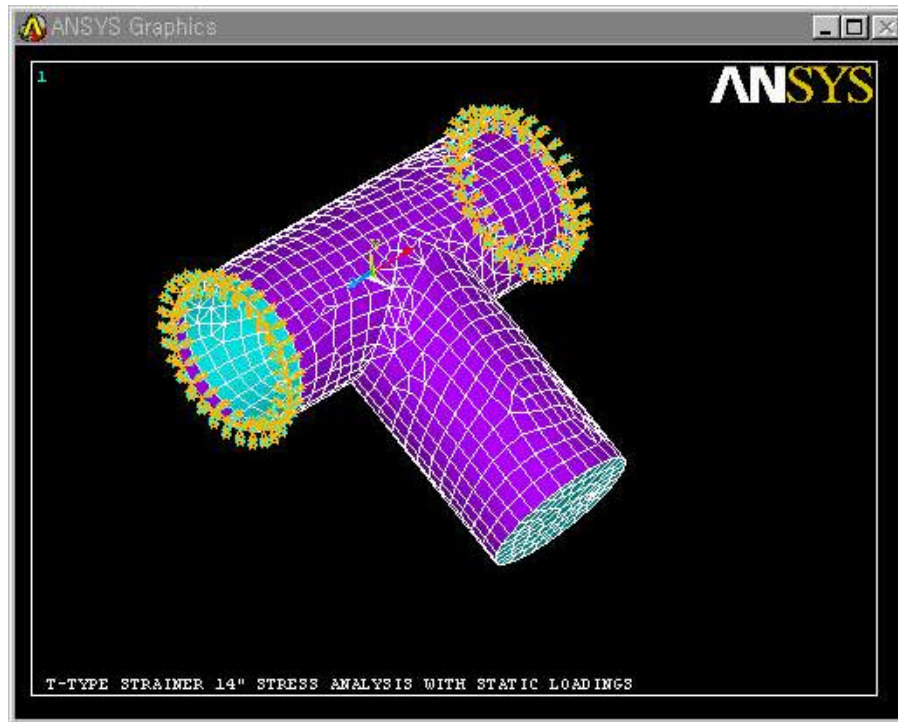


그림 2 스트레이너의 유한요소 모델과 경계조건

### 3. 스트레이너 본체의 구조건전성 평가

#### 3.1 구조건전성 평가기준

스트레이너 본체에 대한 설계요구조건으로 밸브 설계요건인 ND-3500 [2]을 적용한 후, 구조건전성 평가를 보수적으로 수행하기 위해 운전조건 C인 하중조건에 대해 운전조건 A에 대한 허용값을 적용하였으며, 설계압력이 지진 최대압력으로 사용된다. 지진 최대압력 및 지진하중하에서 구조물에 발생하는 응력수준은 다음 식(Table ND-3521-1)들을 만족해야한다. 이때 사용되는 응력은 수직응력 성분인 주응력이며, 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 막응력, 단면에 작용하는 평균응력이며, 압력과 하중에 의해 발생.

$\sigma_b$  = 굽힘응력, 단면에 작용하는 응력의 선형 변화분이며 압력과 하중에 의해 발생.

$S$  = 허용응력, 운전 온도에 따라 결정됨.

### 3.2 모드해석

모드해석은 선형 탄성 구조물의 고유진동수와 모드형상을 계산하는데 사용된다. 해석에서 감쇠효과를 무시하고 질량행렬과 강성행렬이 일정한 자유진동이라 가정한다. 주관 양단이 볼트로 연결되어 있으므로 경계조건을 고정으로 모델하였다. 무감쇠, 자유 진동에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.[5]

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

여기서, [M]과 [K]는 각각 질량행렬 및 강성행렬이며, {u}는 변위 벡터이다. 선형 구조물에 대하여 변위 벡터가 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.

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

ANSYS에서 Householder(reduced) 방법으로 모우드를 추출하였으며[4, 6], 그림 3은 1차 모우드형상을 나타낸 것이다. 1차 모우드는 beam 모우드이나 교차 모우드에서는 쉘모드가 나타난다. 모드해석에 의해 산정된 스트레이너의 기본 고유진동수는 71.7, 72.9, 207, 344, 538 Hz, 등이며, 이는 강건한(rigid) 범위의 하한 값인 33 Hz를 초과하므로 스트레이너를 강건한 기기로 분류할 수 있어 지진하중에 대해 등가정적해석이 가능하다.

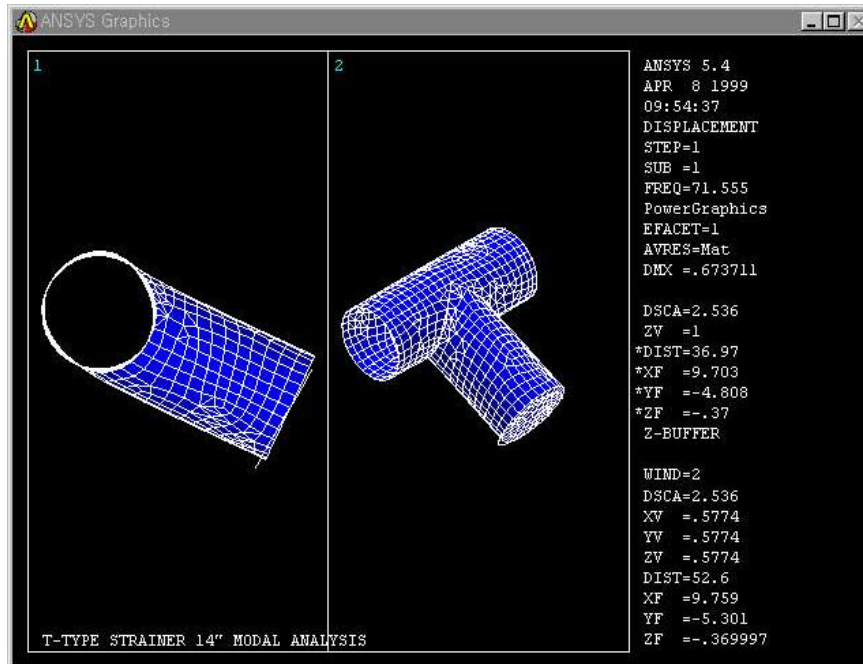


그림 3. 스트레이너의 제 1차 모우드 형상

### 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 지속하중에 의한 응력과 조합되며 허용응력과 비교한다. 등가 정적해석은 비교적 간단한 구조물에 지진하중이 작용하며, 고유진동수 해석에서 구한 기본진동수가 33 Hz를 초과하는 경우, 구조 건전성을 평가하는 데 사용된다.

본 해석에서는 지진하중이 수평방향으로 6.75 g, 수직방향으로 7.75 g 의 가속도로 전 스트레이너에 걸쳐 작용한다고 가정하였다. 또한 지진하중의 방향성을 고려하여 표 2와 같이 4 가지 하중조합에 대해 해석을 수행하였다. 앞의 3.1절의 건전성 평가 기준식 (2)와 (3)에 사용되는 일반 막응력( $\sigma_m$ )과 굽힘응력( $\sigma_b$ )은 ANSYS 후처리 기능에서 구한 최대 주응력을 위치에 따라 분류하여 사용할 수 있다. 일반 막응력( $\sigma_m$ )은 중립축 위치에서의 최대 주응력을 택하며, 일반 막응력( $\sigma_m$ )과 굽힘응력( $\sigma_b$ )의 합인 전응력은 상단 및 하단값 중에서 최대 주응력값을 택하였다.

표 2. 지진하중 조합

Load Case	Seismic Coeff.(6.75 or 7.75) ×g(386.4 [in/sec <sup>2</sup> ])			Internal pressure (psi)
	X	Y	Z	
1	+2608	-2994	+2608	145
2	+2608	-2994	-2608	145
3	-2608	-2994	+2608	145
4	-2608	-2994	-2608	145

최대 일반 막응력( $\sigma_m$ )은 표 3에서 보여주고 있는 3번째 하중조합의 경우에 발생하며 최대값은 14778 psi이고 주관과 분기관의 연결부위와 같은 위험단면에서 발생하고 있다. 일반 막응력( $\sigma_m$ )과 굽힘응력( $\sigma_b$ )의 합인 전응력은 표 4에서와 같이 2번째 하중조합의 경우에 가장 크며 최대값은 19974 psi이고 주관과 분기관의 연결부위와 같은 위험단면에서 발생하고 있다. 그림 4는 각 하중 조합에서 구한 최대 주응력에 관한 응력 등고선을 보여준다. 막응력과 굽힘응력을 사용하여 앞의 3.1절에 제시된 평가기준에 따라 구조 건전성을 평가하였다.

지진하중에 대한 등가정적 해석결과를 표 3과 표 4에 정리하였다. 해석결과 스트레이너에 작용하는 응력은 코드에서 규정하는 허용값 이내에 있으므로 지진하중에 대해 스트레이너 구조물은 구조적 건전성을 유지할 수 있을 것으로 평가된다.

표 3. 지진하중에 대한 막응력 평가

Load Case	Node #	Maximum stress (psi)	Allowable (psi)
1	138	13044	15508
2	254	13032	15508
3	138	14778	15508
4	254	14732	15508

표 4. 지진하중에 대한 전응력(막응력+굽힘응력) 평가

Load Case	Node #	Maximum Stress (psi)	Allowable (psi)
1	548	18872	23262
2	548	19974	23262
3	111	19482	23262
4	538	19164	23262

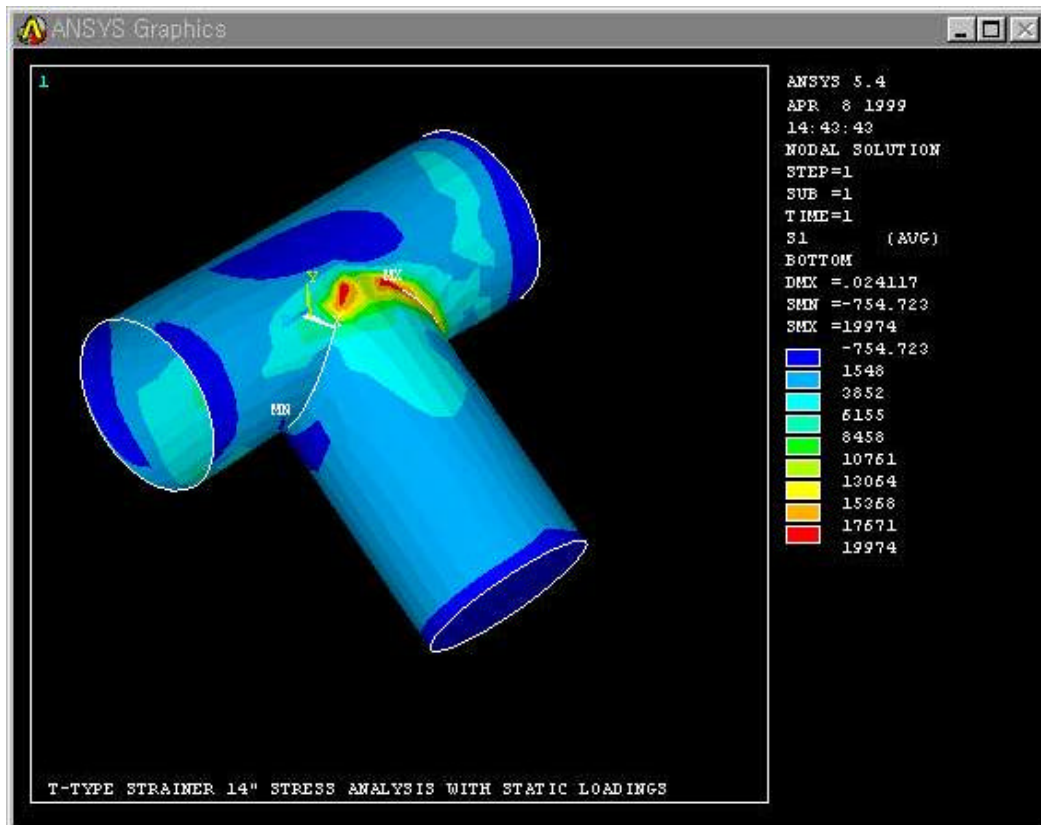


그림 4. 지진하중에 대한 전응력(막응력+굽힘응력) 등고선(Case 2)

#### 4. 플랜지 연결부의 구조건전성 평가

##### 4.1 구조건전성 평가 기준

양쪽 플랜지 연결부에 대한 설계요건으로 배관 설계요건중 ND-3658.3[2]을 적용하였다. 각 운전조건에서 배관 연결부에 작용하는 모멘트는 운전조건에 따른 다음 식[ND-3658.3 식 (12),(13),(17)]들을 만족해야 한다.

#### 4.1.1 설계 및 운전조건 A, B

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

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

여기서,

$M_b$  = 배관의 자중, 열팽창 및 지속적 기계적 하중에 의해 연결부에 작용하는 정적 모멘트

$S_y$  = 설계온도에서의 플랜지 재료의 항복강도(20,244 ksi).

$C$  = 볼트 피치원의 직경(20.25 in)

$A_b$  = 볼트 뿌리부의 단면적(14.77 in<sup>2</sup>)

$M_{bt}$  = 자중, 배관의 열팽창 및 지속적인 기계적 하중뿐만 아니라 동적하중에 의해 연결부에 작용하는 동적 모멘트 즉  $M_{bt}$ 에 동적하중에 의한 모멘트를 합산한다.

#### 4.1.2 운전 조건 C

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

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

여기서,

$P_0$  = 운전조건C에서의 최대 운전 압력(psi)

$P_D$  = 설계압력 (psi) (145 psi)

$D_f$  = 플랜지의 상승 면(raised face)의 외경(16.25 in)

$P_{bt}$  = 동적 모멘트( $M_{bt}$ )에 대한 허용값을 계산할 때 필요한 플랜지 압력

### 4.2 플랜지 연결부의 응력해석

인접 배관과 연결되어 있는 플랜지 연결부는 ASME ND-3658.3[2]에 따라 해석한다. 본 코드는 ANSI B16.5에 규정된 플랜지,볼트 및 가스켓을 사용하며, 100°F에서의 허용응력이 20,000 psi를 넘지 않는 볼트 재료를 갖는 경우에 적용된다.

#### 4.2.1 플랜지 압력

ASME, ND-3658.1(a)에 규정된 플랜지 압력( $P_{fd}$ )을 다음과 같이 구하여 식(10)에 사용한다.

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

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

여기서,

$P$  = 설계압력 또는 운전조건에 따른 압력

$P_{\infty}$  = 등가 압력

$P_{fd}$  = 플랜지 압력

$G$  = 플랜지 가스켓 반력 위치에서의 직경(15.64 in)

#### 4.2.2 내부 모멘트

ANSYS에 의해 수행된 정적 해석에 의해 4가지 하중조건에 따라 플랜지 연결부에서는 각 방향의 내부하중 3개( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )와 내부 모멘트 3개( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ )로 총 6개의 하중 성



분을 표 5와 표 6에서와 같이 얻을 수 있다. 보수적인 설계를 위해 4가지 동적 하중조건에서 얻은 각 하중 성분중 절대값이 가장 큰 성분을 사용하여 식(7), 식(8) 및 식(10)에 사용되는 모멘트 ( $M_B$ ,  $M_D$ )를 아래와 같이 구하였다. X, Y방향은 단면과 평행한 방향이며, Z방향은 단면에 수직 방향이다. 즉 X, Y방향 하중은 전단하중 또는 굽힘 모멘트를 나타내고, Z방향 하중은 축방향하중 또는 비틀림모멘트를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 M_A &= \sqrt{M_{Ax}^2 + M_{Ay}^2} \quad \text{또는} \quad M_{Az} \\
 M_B &= \sqrt{M_{Bx}^2 + M_{By}^2} \quad \text{또는} \quad M_{Bz} \\
 M_B &= M_A + M_B
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

여기서,  $M_A$ 는 플랜지 연결 배관의 자중에 의해 연결부에 작용하는 굽힘 모멘트 또는 비틀림모멘트이며,  $M_B$ 는 플랜지 연결 배관의 열팽창에 의한 연결부에 작용하는 굽힘 모멘트 또는 비틀림 모멘트이다. 배관 관련 코드식 (ND-3653.2 Eq.(10))에서 허용값의 50%를 택하여 배관 설계하중으로 제공하였다. 그리고  $M_D$ 는 동적하중에 의한 연결부의 굽힘 모멘트 또는 비틀림 모멘트이다.

$$\begin{aligned}
 M_D &= \sqrt{M_{Dx}^2 + M_{Dy}^2} \quad \text{또는} \quad M_{Dz} \\
 M_D &= M_A + M_B + M_D
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

표 5. 지진하중에 의한 입구 플랜지 연결부에서 내부 하중 및 모멘트

Load Case Internal Force	CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
F <sub>x</sub> (lb)	1729	-12264	12265	-1728
F <sub>y</sub> (lb)	-10035	-1958	-10067	-1990
F <sub>z</sub> (lb)	-23573	-12947	-20908	-10282
M <sub>x</sub> (in-lb)	150167	64695	124307	38835
M <sub>y</sub> (in-lb)	40294	-108325	142792	-5828
M <sub>z</sub> (in-lb)	-129126	-129177	-42553	-42604

표 6. 지진하중에 의한 출구 플랜지 연결부에서 내부 하중 및 모멘트

Load Case Internal Force	CASE #1	CASE #2	CASE #3	CASE #4
F <sub>x</sub> (lb)	-12881	1113	-1113	12881
F <sub>y</sub> (lb)	-2768	-10845	-2736	-10813
F <sub>z</sub> (lb)	12421	24099	9756	21434
M <sub>x</sub> (in-lb)	-77481	-163754	-51621	-137894
M <sub>y</sub> (in-lb)	119925	-28924	-5542	-154391
M <sub>z</sub> (in-lb)	-12751	-127461	-42343	-42292

각 운전조건에 따라 앞의 4.1절에 제시된 평가기준에 따라 구조 건전성을 평가하였다. 먼저, 입구 플랜지의 경우 운전조건 A, B에서 구한 정적 모멘트( $M_B$ )는 224,989 in-lbf이며 허용값 232,061 in-lbf 이내에 있으며 또한 동적 모멘트( $M_D$ )는 432,209 in-lbf이어서 허용값 464,123 in-lbf 이내에 있다. 운전조건 C에서도 구한 동적 모멘트( $M_D$ )는 432,209 in-lbf이

며 허용값 598,829 in-lbf 이내에 있다. 출구 플랜지의 경우 운전조건 A, B에서 구한 정적 모멘트( $M_{\theta}$ )는 499,661 in-lbf이며 허용값 525,592 in-lbf 이내에 있으며 또한 동적 모멘트( $M_{\theta}$ )는 724,722 in-lbf이어서 허용값 1,051,185 in-lbf 이내에 있다. 운전조건 C에서도 구한 동적 모멘트( $M_{\theta}$ )는 724,722 in-lbf이며 허용값 1,051,185 in-lbf 이내에 있다. 해석결과 플랜지 연결부에 발생하는 정적 및 동적 모멘트는 평가 기준식에서 규정하는 허용값 이내에 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 분기관 바닥을 덮어주는 덮개 플랜지는 ASME, Appendix XI-3250 [3]에 따라 다음 설계 요건을 만족해야 한다.

$$S_H \leq 1.5S_f \quad (15)$$

$$S_R \leq S_f \quad (16)$$

$$S_T \leq S_f \quad (17)$$

$$(S_H + S_R)/2 \leq S_f \quad (18)$$

$$(S_H + S_T)/2 \leq S_f \quad (19)$$

여기서,

$S_H$  = 길이방향 허브 응력

$S_R$  = 반경방향 응력

$S_T$  = 접선방향응력

$S_f$  = 설계온도또는 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. 여기서 관련 변수는 Appendix XI-3250에 규정된 정의에 따른다.

설계조건인 경우 플랜지에 작용하는 전체 모멘트( $M_b$ )는 플랜지에 작용하는 하중이  $H_b$ ,  $H_G$ ,  $H_T$ 이므로 이들 하중에 의해 발생하는 모멘트는  $M_b$ ,  $M_G$ ,  $M_T$ 의 합이다. 가스켓 설치 조건의 경우 전체 모멘트( $M_b$ )는  $W(C-G)/2$  이다.

### 5.3 플랜지 응력

설계조건과 가스켓 설치조건에서의 플랜지 응력이 코드 [XI-3240 식(6),(7),(8)]에 따라 계산된다. 길이방향 허브응력( $S_H$ ), 반경방향 응력( $S_R$ ), 및 접선방향응력( $S_T$ )은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_H = \frac{fM_0}{Lg_1^2B} \quad (20)$$

$$S_R = \frac{(1.33te+1)M_0}{L^2 B} \quad (21)$$

$$S_T = \frac{YM_0}{t^2 B} - ZS_R \quad (22)$$

여기서  $e$ ,  $L$  및  $Z$ 는 코드(XI-3130 및 Fig. XI-3240-1)에 규정된 인수(factor)이다.

앞의 5.1절에 제시된 평가기준에 따라 덮개 플랜지의 구조 건전성을 평가하였다. 먼저, 설계조건에서 구한 길이방향 허브응력( $S_H$ )은 5248 psi이며 허용값 22236 psi 이내에 있고, 반경방향 응력( $S_R$ )은 4062 psi이며 허용값 14824 psi 이내에 있으며, 접선방향응력( $S_T$ )은 4900 psi이며 허용값 14824 psi 이내에 있다. 또한 조합응력 ( $S_H + S_R$ )/2 은 4655 psi이며 허용값 14824 psi 이내에 있고, 조합응력 ( $S_H + S_T$ )/2 은 5074 psi이며 허용값 14824 psi 이내에 있다. 끝으로 가스켓 설치조건인 경우에도 길이방향 허브 응력( $S_H$ )은 14179 psi이며 허용값 23400 psi 이내에 있고, 반경방향 응력( $S_R$ )은 12489 psi이며 허용값 15600 psi 이내에 있으며, 접선방향응력( $S_T$ )은 15066 psi이며 허용값 15600 psi 이내에 있다. 또한 조합응력 ( $S_H + S_R$ )/2 은 13334 psi이며 허용값 15600 psi 이내에 있고, 조합응력 ( $S_H + S_T$ )/2 은 14623 psi이며 허용값 15600 psi 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

하나로(HANARO)의 1차냉각계통 스트레이너에 대한 내진 구조건전성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 하나로 일차냉각계통 스트레이너는 ASME, Class 3로 분류되어 설계와 해석을 위하여 본체는 ASME, ND-3500의 밸브 설계요건을 적용하였고, 양쪽 플랜지 연결부는 배관 설계요건중 ND-3658.3을 적용하였으며, 덮개 플랜지는 Appendix XI-3250을 적용하였다.
- 2) 지진하중에 의해 스트레이너 구조물에 발생하는 응력수준은 코드에 규정한 허용값 이내에 있으므로 구조적 건전성을 유지할 수 있다고 평가할 수 있다.
- 3) 양단 플랜지와 분기관 하단의 덮개 플랜지는 설계요구조건을 모두 만족하고 있으므로 구조적으로 건전하다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

## 7. 참고 문헌

- [1] 하나로 안전성 분석보고서, KAERI/TR-710/96, 한국원자력연구소, 1996.
- [2] ASME Section III, Division 1, Subsection ND, 1983 Edition thru Addenda
- [3] ASME Section III, Division 1, Appendix XI, 1983 Edition thru Addenda
- [4] ANSYS 5.4, User's Manual
- [5] Clough, Ray W., and Penzien, "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, 1975
- [6] Suhm 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.