

하나로 수조고온층계통 배관 및 지지구조물에 대한 구조건전성 평가

Structural Evaluation of Pipings and Support Structures for HANARO Hot-Water Layer System

류정수, 우종섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

김기석

한국전력기술주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로 수조 상부의 방사선 준위를 줄이기 위하여 하나로에 수조고온층계통을 설치하게 되었다. 본 연구의 목적은 ASME 설계요건에 따라 응력해석을 수행하여 배관 및 지지구조물의 구조건전성을 평가하는 것이다. 운전조건에 따라 자중, 압력, 열팽창 및 지진하중을 받는 펌프 흡입관과 토출관에 대한 배관응력해석을 수행하였다. 또한 배관응력해석으로부터 얻은 반력을 하중으로 사용하여 배관 지지구조물에 대한 응력해석을 수행하였다. 이들 응력해석 결과들은 수조고온층 배관에 대해서는 ASME, Subsection ND와 지지구조물에 대해서는 Subsection NF의 설계 요구조건들을 모두 만족시켰다. 따라서 설계와 해석 결과들로부터 수조고온층 배관 및 지지구조물에 대한 구조건전성이 입증되었다.

Abstract

Hot-water layer system to reduce the radiation level at the top of reactor pool has been installed in HANARO. The major goal of this paper is to assess the structural integrity for pipings and support structures of hot-water layer system according to ASME code. The piping stress analysis was performed for the pump suction and discharge lines subjected to dead weight, pressure, thermal expansion and seismic loadings. The stress analysis of the support structure was carried out using the reaction forces obtained from the piping stress analysis. The results of the stress analysis were fully satisfied with the structural acceptance criteria of the ASME, Subsection ND for the pipings and the Subsection NF for the support structures. Therefore based on the results of the analysis and the design, the structural integrity on the piping and the support structures of hot-water layer system was proved.

1. 서 론

열출력 30MWt, 개방수조형인 하나로(HANARO)는 초기임계에 도달한 이후로 현재는 20MWt로 운전하고 있으며 방사선 동위원소를 주로 생산하고 있다.

하나로 일차냉각계통은 냉각수의 설계유량이 780 kg/sec로서 이중 90 %는 노심 냉각관로로 흐르며 우회관로에는 나머지 10 %가 원자로 수조 바닥으로 흐른다. 하나로 출력 상승시 시험 운전중, 우회 유동 냉각수의 수온이 원자로 수조 상부 온도보다 높을 때 수조 상부의 방사능 준위가 증가한 경우가 관찰되었다. 이러한 현상은 노심 근처에서 방사화된 비교적 더운 우회유동 냉각수가 수조 상부에 떠오르기 때문이다. 이를 극복하는 방법으로 수조 상부에 고온층을 형성시켜 수조내의 어떤 부분보다 수온을 높게 유지하는 수조고온층 설비 계통을 설치하면 방사화된 냉각수가 수조 상부로 떠오르지 못하여 방사능 준위를 낮게 유지할 수 있다.[1]

수조고온층계통은 원자로 수조 외부에 설치되며 기존의 설계 개념과 운전 형태에 위반되지 않을 뿐만 아니라 이 장치로 인하여 하나로 기술지침에 영향을 주지 않는다. 단지 설계 개념상 수조고온층계통의 일부 배관이 원자로 수조내 안전관련 구조물에 근접하여 있으므로 내진해석을 포함한 구조건전성 평가가 요구되었다.

따라서 하나로 수조고온층 설치시방서[2]를 기반으로 배관 및 지지구조물의 설계 및 해석을 각각 ASME, Subsection ND (Class 3)[3]와 NF[4]에 따라 완료하였다.[5] 그러나 현장 설치 이후 초기 시험에서는 고온층이 잘 형성되지 않아서 수차례 시험과 검증을 수행하여 방사선 준위를 줄일 수 있도록 하였으며 후속조치로 설계변경이 이루어졌다. 따라서 최종 설계 변경된 배관 및 지지구조물에 대하여 운전조건과 설계요건에 따라 자중, 압력, 열팽창 및 지진하중을 모두 고려한 응력해석이 재수행되었다.[6] 배관 및 지지구조물의 응력해석 결과는 ASME 코드의 설계 요구조건들을 모두 만족하여 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.

2. 수조고온층 계통의 구조

수조고온층계통은 원자로 수조 상부의 수조수를 일부 뽑아내어 가열시키고 다시 수조 상부로 순환시키기 위하여 순환펌프, 전기온수기, 필터 및 배관으로 구성되어 있다.[2] 수조고온층을 형성하여 수조 상부 방사선의 영향을 줄이기 위한 수차례의 시험과 검증과정을 통하여 다음과 같이 설계변경이 이루어졌다. 1) 원자로 수조내 흡입관 선단이 수조 수위로부터 당초 1.8m 아래에 위치하였으나, 1.2m를 줄여 토출관과 같이 수조 수위로부터 0.6m 위치로 변경하여 고온층을 형성하도록 하고 있다. 2) 수조 내의 유체유동을 주위의 수조수와 원활히 혼합하기 위하여 토출관 선단에 있는 수조 중심방향으로 30cm의 L형 배관을 수조 원주방향으로 양쪽에 40cm의 T형 배관으로 변경하였다. 3) 또한 내진해석을 수행하여 stanchion 타입 지지구조물에 대한 평가결과를 기반으로 바닥판과 접하는 용접부를 3mm에서 5mm로 증가시켜 추가 용접을 완료하였다.

3. 설계 기준

수조고온층계통의 배관의 설계 및 해석을 위한 하중조합과 응력한계는 Subsection ND (Class 3)를 적용하며, 지지구조물은 Subsection NF를 적용하였다. 또한 수조고온층 흡입관과 토출관은 내압이 작용하는 직관이므로 ND-3641.1 설계요건에 따라 배관의 최소두께를 계산한다. 흡입관과 토출관의 설계상 계산된 최소두께는 각각 0.099 및 0.095 인치이며 실제 두께가 각각 0.154 및 0.145 인치로 모두 최소두께보다 크므로 설계요구조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

3.1 설계하중

수조고온층계통 배관에 대한 설계 및 해석을 위한 설계하중은 다음과 같다.

(1) 자중(DW): 배관과 밸브 및 그 외의 계통 구성품의 중량을 고려한 하중을 총칭한다.

(2) 설계압력(PD): 설계압력은 1 Mpag(145psi)이며, 운전압력도 설계압력으로 정하였다.

(3) 열팽창(TH): 설계온도는 100℃이며 대기중 온도를 기준하여 열팽창량을 산정한다.

(4) 지진하중(OBE, SSE): 배관 설치 지지점에서의 층응답스펙트럼(FRS) 상에서 각 배관 지지점에 미치는 2개의 수평력과 1개의 수직력을 조합하는 하중으로, 운전기준지진(OBE)과 안전정지지진(SSE)이 있다. 사용된 감쇠비는 USNRC RG 1.61 [7]를 참조하였으며, 본 계통의 배관이 12인치 이하의 배관에 속하므로 OBE는 1%인 FRS를, SSE는 2%의 FRS를 적용하였다. 보수적인 설계를 위하여 수조 상부의 FRS를 사용하였다.

3.2 하중조합 및 응력한계

수조고온층계통 배관의 하중조합은 아래 표 1과 같으며, 지진하중 SSE를 운전조건 C에 포함하였다. 표 1의 각 운전조건에 대한 하중조합과 허용응력은 ND-3650의 기준인 식 (8), (9), (10) 및 (11)을 만족해야 한다.[3]

표 1. 수조고온층계통 배관 및 지지구조물에 대한 하중조합

Design Service Level	Loading Combination	
	Piping	Support Structures
Design	PD+DW	-
Service Level A	PO+DW	DW+TH
Service Level B	PO+DW+OBE	DW+TH+OBE
Service Level C	PO+DW+SSE	DW+TH+SSE

배관이 Class 3에 따라 설계되었으므로 배관 지지구조물도 같은 기준을 따라 표 1과 같이 하중조합 할 수 있었다. 배관 지지구조물의 허용응력은 NF-3322에 따르며, 운전조건 A, B 및 C에 적용되는 응력한계계수는 각각 1.0, 1.33 및 1.5가 된다.[4]

배관의 재질은 ASTM, A312, Gr TP304, seamless, sch. 40이며, 지지구조물의 재질은 모두 스테인레스강으로 ASTM, A240, Gr 304와 KS STS 제품이 사용되었다.

4. 배관 응력 해석

4.1 구조해석 모형화

흡입관은 원자로 수조로부터 펌프 전단까지의 배관이며 토출관은 수조로부터 전기온수기 노즐까지의 배관으로 모두 수조에 잠긴 배관은 캔틸레버 구조와 같이 자유단을 가진다. 흡입관과 토출관에 대한 단면 형상은 표 2와 같다.

표 2. 수조고온층 흡입관과 토출관의 단면 형상자료

	Suction Line	Discharge Line
Pipe	2", sch 40	1½", sch 40
Outer Diameter	2.375" (60.5mm)	1.90" (48.6mm)
Thickness	0.154" (3.9mm)	0.145" (3.7mm)

수중에 잠긴 배관에 대한 단위길이당 동적유체질량은 다음 식에 따라서 계산하였으며 질량밀도 대신에 중량밀도를 사용하여 단위길이당 중량(w_h)을 산정하였다.[8]

$$w_h = \rho \pi a^2$$

여기서, ρ = 주위 유체의 중량밀도

a = 배관의 외부반경

각 배관에 대해 계산된 단위길이당 중량은 내부 유체를 포함하여 배관(w_{pipe}), 단열재를 포함한 배관(w_{ins}) 및 수중에 잠긴 배관(w_{submer})에 대하여 나눠 표 3에서 결과를 정리하였다. 여기서 보수적인 해석을 수행하기 위하여 배관의 세 방향에 같은 단위길이당 중량을 적용하였다.

표 3. 수조고온층 배관의 단위길이당 중량 (lbs/in)

	Suction Line	Discharge Line
w_{pipe}	0.426	0.30
w_{ins}	0.468	0.342
w_{submer}	0.585	0.404

실측도면으로부터 작성된 흡입관의 유한요소모형이 그림 1에 나타나 있으며, 토출관의 유한요소모형은 그림 2에 나타나 있다. 유한요소 모형화에서는 좌표계에 따라 각 절점에 6 자유도계의 병진 및 회전 자유도계를 갖는 파이프 요소를 사용하여 3차원 구조로 모델링하였다. 경계조건으로 앵커는 6방향을 모두 고정하였으며, U 볼트나 stanchion 등은 구속되는 두 방향으로만 고정하였다.

4.2 구조해석 방법

그림 1과 그림 2의 흡입관과 토출관의 유한요소모형에 대해 정적해석과 동적해석을 수행하였다. 이들 해석을 위해 배관응력해석 프로그램인 『ADLPIPE』 [9]를 이용하였다. 제 3.1 절의 설계하중인 자중, 압력 및 열팽창은 정적해석으로 수행하였으며, OBE와 SSE 지진하중에 대해서는 응답스펙트럼해석으로 내진해석을 수행하였다.

응답스펙트럼해석에서는 자유진동해석을 subspace법으로 수행하여 제 1 고유진동수를 흡입관은 7.8 Hz, 토출관은 3.7 Hz로 구하고, 50 Hz까지의 모우드를 사용하였다. 구한 모우드들 간의 응답조합을 위해 NRC Reg. Guide 1.92 [10]에서 제시하고 있는 그룹 방법을 사용하여 각 입력 지진방향에 대한 응답을 구하였다. 또한 각 지진방향별로 구해진 응답은 다시 세 지진방향에 대하여 SRSS 방법으로 조합하여 지진에 의한 최종응답을 구하였다. 응답스펙트럼해석에서 파이프 요소의 각 절점에 대하여 세방향 축력과 모멘트뿐만 아니라 6 자유도 변위를 해석결과로부터 얻을 수 있었다.

배관응력해석 전문프로그램인 『ADLPIPE』에서는 각 절점의 힘과 모멘트들을 후처리할 수 있으며, ASME 코드에 따라 응력을 조합한 후, 그 응력과 허용응력을 비교하여 준다. 본 계통은 Class 3로 설계 및 해석되므로 앞의 제 3.2절에서 기술한 ND-3650의 설계기준이 만족되어야 한다.[3]

4.3 배관 응력해석 결과

『ADLPIPE』는 제 3.2절의 하중조합에 따라 산정된 응력(total)과 허용응력(allowable)과의 응력비(total/allowable)를 계산하여 주는 데, 그 값이 1보다 작으면 코드의 요구조건을 만족하는 것으로 판정할 수 있다. 본 계통의 흡입관과 토출관에 대해 각 운전조건과 ND-3650 설계기준의 식 (8), (9), (10) 및 (11) 별로 최대 응력값과 응력비를 표 4에 정리하여 나타내었다. 표 4를 보면 흡입관과 토출관의 최대 응력비가 모두 1 보다 작아 ASME 요구조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

표 4. 수조고온층 흡입관 및 토출관에 대한 최대응력 및 응력비

Service Condition	ND-3650	Suction Line			Discharge Line		
		Node	Stress (psi)	Stress Ratio	Node	Stress (psi)	Stress Ratio
Design	Eq.(8)	211	3706	0.16	331	12537	0.53
Service Level A&B	Eq.(9), OBE	63	13307	0.47	331	23192	0.82
	Eq.(10)	217	19793	0.84	96	26513	1.13
	Eq.(11)	217	20564	0.52	96	28477	0.73
Ser. Level C	Eq.(9), SSE	211	15173	0.43	335	27316	0.77

흡입관의 최대 응력비를 살펴보면 압력과 자중에 대한 식(8)에서 0.16이며, 열팽창에 대한 식(10)과 (11)에서 각각 0.84와 0.52이다. 또한 지진하중에 대한 식(9)의 최대응력비가 SSE, 절점 211에서 0.43이며, OBE, 절점 63에서 0.47로 구조적으로 건전함을 알 수 있었다. 특히 안전관련구조물에 인접하면서 동적거동에 취약한 수조쪽 절점 13의 응력비는 OBE에 대해 0.30, SSE에 대해 0.29로 모두 허용응력 내에 있음을 알 수 있다. 이는 흡입관 선단이 당초 설계보다 1.2m 짧게 설계 변경되었으므로 응력비가 작아졌음을 알 수 있었다.

또한 토출관의 최대 응력비를 살펴보면 식(8)에서 0.53이며, 열팽창 식(10)과 (11)의 절점 96에서 각각 1.13과 0.73이다. 열팽창에 대한 식(10)에서 허용기준을 초과하는 경우에는 코드에서 요구하는 식(11)만을 만족하면 된다. 지진하중에 대한 식 (9)의 최대응력비가 OBE, 절점 331에서 0.82이며, SSE, 절점 335에서 0.77로 모두 1보다 작았다. 여기서 지진하중 OBE에 대한 식(9)의 응력비가 SSE인 경우보다 큰 것을 보면, 지진하중 OBE를 적용한 설계가 더 지배적임을 알 수 있다. 또한 동적거동에 취약한 것으로 판단되었던 수조내 절점 11의 응력비는 OBE에서 0.40, SSE에서 0.38로 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.

5. 배관 지지구조물에 대한 구조건전성 평가

배관응력해석으로부터 각 지점의 반력을 자중 및 열팽창은 정하중이므로 대수합으로 구하며, 지진하중은 동하중이므로 절대합으로 조합하여 최종 산정하였다. 지지점들의 반력들은 전체 좌표계로 나타나며 지지구조물에 설계하중으로 작용하게 된다. 운전조건에 따른 자중, 열팽창, OBE 및 SSE 지진하중에 대한 하중조합이 표 1에 나타나 있으며, 허용응력은 NF-3322를 따라서 배관 지지구조물에 대한 구조건전성 평가를 수행하였다.

5.1 흡입관 지지구조물

5.1.1 U 볼트

흡입관의 U 볼트 지지구조물은 절점 17, 25, 33 및 90의 지점이며, 2 인치인 U 볼트의 허용힘은 F_x 는 242 lbs이며, F_y 는 1190 lbs이다.[11] U 볼트 지점중에 최대 반력이 F_x 는 102 lbs이며, F_y 는 389 lbs로 모두 허용힘보다 작아 구조적으로 건전하다.

5.1.2 Stanchion 지지구조물

흡입관의 stanchion은 절점 43, 53, 61, 67, 75, 77 및 93 지점에 설치되며, 최대 수직하중 및 횡하중은 운전조건 A에서 185 와 206 lbs, 운전조건 B에서 236 와 405 lbs이며 운전조건 C에서 242 와 427 lbs이다. 운전조건에 따라 최대하중을 받는 stanchion 지지구조물의 1) 배관과 stanchion 사이의 용접부, 2) stanchion의 맨 아래 단면, 3) stanchion과 바닥판 사이의 용접부, 4) 바닥판, 5) 하부 지지판 및 용접부, 등에 대한 압축응력, 휨응력, 전단응력 및 조합응력을 구하였으며 모두 허용응력보다 작아 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.

5.1.3 수직방향 지지구조물

수직방향 지지구조물은 1½인치 schedule 40인 파이프이며, 절점 120 및 138 지점에 설치되어 있다. 해석 결과로부터 하중 조합된 수직방향 힘이 운전조건 C에서 최대 값이 167 lbs이며 허용응력보다 훨씬 작아 결과는 만족되었다.

5.1.4 U 볼트 및 Stanchion의 하부구조물

U 볼트와 stanchion을 지지해주는 하부구조물(앵글)은 캔틸레버 형식뿐만 아니라 지점의 경계조건에 적합한 콘크리트에 앵커 되거나 용접 구조형상으로 설계되어 배관을 최종적으로 지지하는 역할을 한다. 하부구조물에 작용하는 하중은 U 볼트나 stanchion 타입구조물이 받는 힘과 모멘트가 된다. 이 때 배관과 하부구조물 선단까지의 거리가 U 볼트는 1.19 인치이며 stanchion은 5.12 인치이다. 운전조건 C의 조합으로 응력을 구하고, 운전조건 A의 허용응력을 적용하여 보수적인 평가를 수행하였다. 운전조건 A의 허용축응력, 허용휨응력 및 허용전단응력은 각각 18, 19.8 및 12 ksi가 된다. 각 하부구조물에 대하여 운전조건에 따라 평가된 부재, 용접부 및 콘크리트 앵커에 대한 응력값이 모두 허용응력보다 작아 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.

5.2 토출관 지지구조물

5.2.1 U 볼트

토출관의 U 볼트 지지구조물은 절점 7, 18, 24, 32, 46, 58, 63, 70, 82, 94, 106, 118, 128 및 146 지점에 설치되며 1½인치인 U 볼트의 허용힘은 F_x 는 374 lbs이며, F_y 는 1190 lbs이다.[11] 이들 지점들 중에 최대 반력이 F_x 는 256 lbs이며, F_y 는 427 lbs로 허용힘보다 작아 구조적으로 건전한 것으로 평가할 수 있다.

5.2.2 Clevis Pipe Clamp

절점 158, 174 및 204 지점은 수직방향으로 매달 수 있는 clevis pipe clamp 구조물로 설

치되어 있다. 그림 14에서 보여주는 바와 같이 1/2" ~ 2"인 배관에 대해 수직방향으로 허용할 수 있는 하중은 595 lbs이다.[11] Clevis pipe clamp의 최대 반력은 204 지점에서 109 lbs로 허용하중보다 작아 구조적으로 건전함을 알 수 있다.

5.2.3 U 볼트의 하부 지지구조물

U 볼트로 지지해주는 하부구조물은 캔틸레버 형식뿐만 아니라 지점의 경계조건에 적합한 콘크리트에 앵커되거나 용접 구조형상으로 설계되어 배관을 최종적으로 지지한다. 하부구조물에 작용하는 하중은 U 볼트가 받는 힘과 모멘트이며, 배관과 하부구조물 선단까지의 거리는 0.95인치이다. U 볼트가 받는 힘과 모멘트가 전달된 하부구조물은 구조적으로 안전해야 하며 건전성 평가를 비슷한 형상을 가지는 구조물로 나눠 효율적으로 수행하였다. 각 하부구조물에 대하여 운전조건에 따라 평가된 부재, 용접부 및 콘크리트 앵커에 대한 응력값이 모두 허용응력보다 작아 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.

6. 결 론

하나로(HANARO)의 원자로 수조고온층 배관에 대한 응력해석과 배관 지지구조물의 구조건전성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수조고온층에 대한 설계와 해석을 위하여 배관은 ASME, Subsection ND (Class 3)의 설계요건을 적용하였으며, 배관 지지구조물은 Subsection NF를 적용하였다.
- 2) 흡입관과 토출관에 대한 최소두께를 ND-3641.1 요건에 따라 계산한 결과 모두 실제두께보다 작아 설계요건을 만족하였다.
- 3) 배관과 지지구조물에 대하여 운전조건 A, B 및 C에 따라 하중 조합한 후, 배관응력해석을 수행하였으며 최대 응력들이 모두 허용응력보다 작아 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.
- 4) 배관응력해석의 반력으로부터 배관 지지구조물에 대한 응력해석을 수행하여 구한 최대 응력들이 모두 허용응력보다 작아 구조적으로 건전하다고 판단되었다.

7. 참고 문헌

- [1] “하나로 수조수 상부 고온층 설비 추가 설치와 관련한 변경 허가 신청”, 하나운영노 721-2074, 한국원자력연구소, 1996.7.24.
- [2] 박용철, “하나로 수조 고온층 설치 시방서”, HAN-RS-CT-SP-347-96-001, 1996. 7.5.
- [3] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Division I, Section III, Subsection ND, “Class 3 Components”, 1989 Edition.
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Division I, Section III, Subsection NF, “Component Supports”, 1989 Edition.
- [5] 류정수, 하나로 수조 고온층 계통의 배관 및 지지구조물에 대한 구조건전성 평가, KARI/TR-805/97, 한국원자력연구소, 1997.
- [6] 류정수, 설계변경된 수조고온층계통 배관 및 지지구조물에 대한 구조건전성 평가, KARI/TR-1048/98, 한국원자력연구소, 1998.
- [7] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Damping Values for Seismic Design of

Nuclear Power Plants”, Regulatory Guide 1.61, Rev.1, 1973.

- [8] R.D. Blevins, “Formulas for Natural Frequency and Mode Shape”, Van Nostrand Reinhold Company, 1979.
- [9] ADLPIPE, Static and Dynamic Pipe Design and Stress Analysis Input Preparation Manual, ADLPIPE Inc., 1992.
- [10] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Combinig Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis”, Regulatory Guide 1.92, Rev.1, 1976.
- [11] KAERI and KOPEC, “Pipe Support Standard and Detail”, 1992.

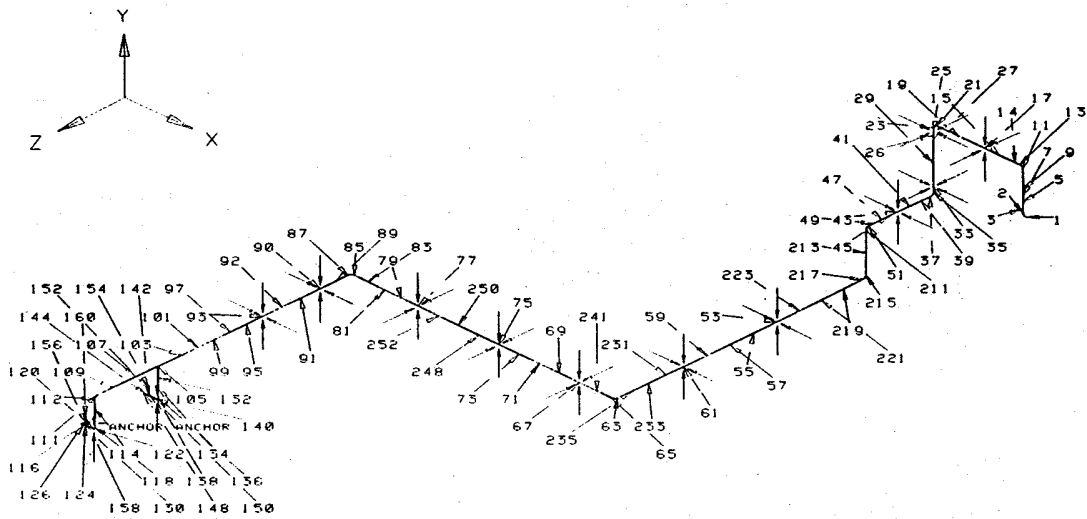


그림 1. 수조고온층 흡입관에 대한 유한요소모형

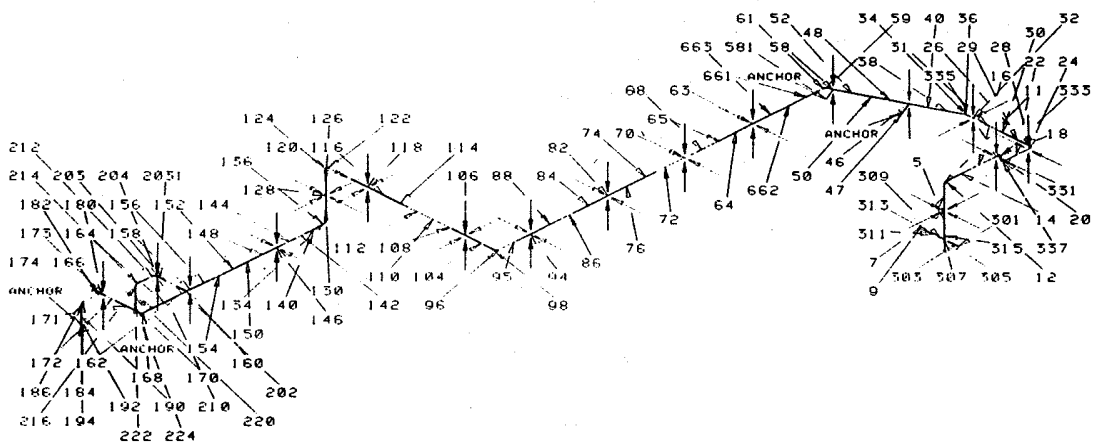


그림 2. 수조고온층 토출관에 대한 유한요소모형