

CIVIL NX | 내압관 모델링(열수송관련)

임정현 | 구조사업팀 프로

안녕하세요. 마이다스아이티 구조사업팀 임정현 프로입니다.

오늘은 Civil NX를 활용한 내압관 모델링, 그중에서도 열수송관을 대상으로 한 구조해석 절차를 설명드리겠습니다.

이번 강의는 단순히 프로그램 기능을 따라가는 내용이 아니라, 내압관에 어떤 하중이 작용하고,

그 하중을 Civil NX에서 어떻게 구현하며, 해석 결과를 계산서와 어떻게 비교하는지까지 연결해서 설명드리는 것이 목적입니다.

오늘은 PPT 설명과 Civil NX 실습 화면을 같이 보면서 진행하겠습니다.

CONTENTS

01 내압관 개요

- 내압관의 정의, 종류, 손상 형태, 설계 기준 체계

02 열수송관 기본 이론

- 하중 산정식, 외압 휨응력, 좌굴하중, 내압 온도응력

03 Civil NX 구조해석 모델링

- 500 예제 조건, 모델 생성, 경계조건, 하중 재하, 하중조합

04 Civil NX 결과분석

- 응력 추출, 계산서 비교, 안전율 산정

오늘 내용은 네 부분으로 구성되어 있습니다.

먼저 내압관이 무엇인지, 그리고 어떤 종류의 내압관이 SOC 구조물에 포함되는지 간단히 살펴보겠습니다.

그다음 열수송관 구조검토에 필요한 기본 이론, 즉 토압, 차량하중, 외압 휨응력, 좌굴하중, 내압응력, 온도응력을 정리하겠습니다.

세 번째로 Civil NX에서 열수송관을 어떻게 모델링하는지 보여드리고, 마지막으로 해석 결과를 추출해서 계산서 형식의 안전율 검토까지 진행하겠습니다.

01. 내압관 개요

Pressure Pipeline Overview

내압관의 구조적 특성과 SOC 시설별 적용 기준을 이해하고, 열수송관 구조해석의 기본 검토 범위를 정리한다.

먼저 내압관의 개요부터 보겠습니다.

이 파트는 뒤에서 열수송관을 왜 이런 방식으로 모델링하고, 어떤 결과를 확인해야 하는지 이해하기 위한 배경 설명입니다

내압관 개요

내압관이란?

- 내압관은 관 내부에 물, 열매체, 증기, 가스, 석유류 등 유체가 흐르며, 그 유체의 압력에 의해 관벽에 응력이 발생하는 관로이다.
- 내압관은 단순히 내부압력만 받는 구조물이 아니라, 매설 상태에서는 외부 토압, 차량하중, 지반반력, 온도변화, 부등침하 등의 영향을 함께 받는다.

구분	주요 작용
내부 작용	내압, 수격압, 유체중량, 온도변화
외부 작용	매설토압, 차량하중, 지하수압, 부력
지반 작용	지반반력, 부등침하, 액상화, 측방유동
배관계 작용	곡관 추력, 앵커 반력, 가이드 반력, 신축변형
장기 열화	부식, 감육, 피복 손상, 누수

내압관은 내부에 물, 열매체, 증기, 가스, 유류와 같은 유체가 흐르고, 그 유체의 압력에 의해 관벽에 응력이 발생하는 관로입니다.

여기서 중요한 점은, 내압관이 단순히 내부 압력만 받는 구조물이 아니라는 것입니다.

특히 매설관의 경우 내부압력뿐만 아니라, 상부토압, 차량하중, 지반반력, 온도변화, 부등침하 등이 함께 작용합니다.

따라서 내압관을 검토할 때는 내부압력, 외부하중, 지반조건, 그리고 배관계 구속조건을 함께 고려해야 합니다.

내압관 개요

내압관의 종류

구분	대표 시설	주요 검토 항목
열수송관	지역난방관, 냉수관, 증기관	내압, 온도응력, 신축흡수, 토압, 차량하중, 부식
상수도관	도수관, 송수관, 배수관, 급수관	수압, 수격압, 이탈방지, 내진, 토압
하수 압송관	펌프장 토출관, 압송관	펌프압, 수격압, 내부부식, 밸브실 접속부
가스관	도시가스관, 고압가스관, 수소배관	KGS Code, 기밀성, 방식, 매설심도, 이격거리
송유관	송유관, 유류 이송관	설계압력, 압력안전장치, 누유검지, 긴급차단
공업용수관	해수관, 냉각수관, 공업용수관	내압, 수격압, 부식, 펌프압, 지반조건

SOC 구조물에서 내압관은 여러 분야에 적용됩니다.

상수도관은 수압과 수격압, 이탈방지 검토가 중요하고, 가스관은 기밀성, 방식, 매설심도, 이격거리 등이 중요합니다.

송유관은 누유검지, 긴급차단, 압력안전장치가 중요하고, 공업용수관은 부식이나 펌프압 검토가 중요합니다.

오늘은 이 중에서 열수송관을 대표 예제로 다루겠습니다.

열수송관은 내압뿐만 아니라 온도응력과 신축거동이 매우 중요한 관로입니다.

내압관 개요

내압관 손상 형태

손상	원인	검토 항목
원주방향 인장	내압 증가	내압응력
축방향 인장	폐단효과, 온도구속	축응력, 앵커반력
외압 휨	토압, 차량하중	외압 휨응력
좌굴	외압, 지하수압, 얇은 두께	허용좌굴하중
이음부 이탈	곡관추력, 수격압	이탈방지, thrust block
타원화	외압, 연약지반	관경변형
부식·감육	토양부식, 내부부식	잔존두께

내압관에서 발생할 수 있는 손상은 응력 문제, 변형 문제, 열화 문제로 나눌 수 있습니다.

내압이 커지면 원주방향 인장응력이 발생하고, 폐단효과나 온도구속이 있으면 축방향 응력이 발생할 수 있습니다.

토압과 차량하중은 관벽에 외압 휨응력을 만들고, 조건에 따라 좌굴이나 타원화를 유발할 수 있습니다.

그래서 Civil NX 결과를 볼 때도 단순히 최대응력 하나만 보는 것이 아니라, 내압응력, 외압응력, 온도응력, 좌굴 안정성을 구분해서 봐야 합니다.

내압관 개요

내압관 설계 기준 체계

분야	국내 기준 예	해외·전문 기준 예
열수송관	집단에너지시설의 기술기준, 한국에너지공단 열수송관 안전진단 매뉴얼	EN 13941
상수도 강관	KDS 57, KS/KWWA	AWWA M11
발전·고온 배관	KEPIC 등	ASME B31.1
산업 배관	KS, KEPIC, 발주처 기준	ASME B31.3
액체·유류 배관	송유관 관련기준	ASME B31.4
가스배관	KGS Code	ASME B31.8

내압관은 시설 종류에 따라 적용 기준이 다릅니다.

열수송관은 집단에너지시설의 기술기준과 한국에너지공단의 열수송관 안전진단 매뉴얼 등을 확인해야 합니다.

상수도관, 가스관, 송유관도 각각 다른 기준과 전문 자료를 따르게 됩니다.

오늘 자료는 교육용 예제이므로, 실제 설계나 진단에 적용할 때는 반드시 최신 기준, 발주처 기준, 그리고 현장 조건을 확인해야 합니다.

열수송관 기본 이론

Theory & Design Equations

열수송관 안전성 검토에 필요한 외압, 내압, 온도하중 산정식을 정리하고, 예제를 통해 계산 흐름을 이해한다.

본 자료는 교육용 예제이며, 실제 설계·진단 적용 시에는 최신 「집단에너지시설의 기술기준」, 한국에너지공단 열수송관 안전진단 매뉴얼, 발주처 기준을 확인한다.

이제 열수송관 구조검토에 필요한 기본 이론을 살펴보겠습니다.

여기서는 하중을 어떻게 산정하는지, 그리고 그 하중이 어떤 응력 검토로 연결되는지를 정리합니다.

이 내용을 이해해야 Civil NX에서 어떤 하중을 입력하고, 어떤 응력 결과를 확인해야 하는지 판단할 수 있습니다.

열수송관 기본 이론

열수송관 구조검토의 기본 하중

열수송관 구조검토에서는 다음 하중을 기본적으로 검토한다.

구분	하중	검토 내용
외압	상부토압 (W_b)	매설깊이, 흙 단위중량, Arching 효과
외압	차량하중 (W_t)	도로 활하중, 충격계수, 하중분산
외압	휨응력 (σ_b)	토압 + 차량하중에 의한 관벽 휨응력
외압	좌굴하중 (q_a)	외압에 대한 좌굴 안정성
내압	내압응력 (σ_p)	관내압에 의한 원주응력
온도	온도응력 (σ_t)	온도변화와 구속에 의한 응력
추가 검토	수격압, 침하, 지진	조건에 따라 별도 반영

열수송관에서 기본적으로 검토하는 하중은 크게 외압, 내압, 온도하중입니다.

외압에는 상부토압과 차량하중이 포함됩니다.

이 외압은 관 단면을 찌그러뜨리면서 외압 휨응력을 발생시킵니다.

내압은 관 내부 압력에 의해 원주방향 응력을 발생시키고, 온도하중은 관이 길이방향으로 팽창하려는 것을 구속할 때 응력을 발생시킵니다.

필요에 따라 수격압, 침하, 지진 등도 추가로 검토할 수 있습니다.

계산에 필요한 입력자료

입력값	의미	취득 방법
D_i, D_o, t	내경, 외경, 두께	설계도서, 준공도, 초음파두께측정
H	매설깊이	준공도, GPR, 맨홀 실측
γ_t	흙 단위중량	지반조사, 실내시험
ϕ	내부마찰각	직접전단시험, 삼축압축시험, 지반보고서
E'	흙의 반력계수	평판재하시험, 지반조사, 매뉴얼 기준
P	관내압력	운전자료, 설계조건
E	탄성계수	재료규격, 성적서
α	열팽창계수	재료물성표
ΔT	온도변화량	설치온도, 예열온도, 운전온도

계산에 필요한 입력자료는 크게 네 가지입니다.

첫 번째는 관 제원입니다. 내경, 외경, 두께 같은 값입니다.

두 번째는 지반조건입니다. 매설깊이, 흙의 단위중량, 내부마찰각, 흙의 반력계수 등이 포함됩니다.

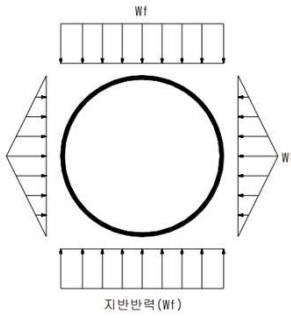
세 번째는 운전조건입니다. 관내압력, 온도변화량 같은 값입니다.

마지막은 재료조건입니다. 탄성계수, 열팽창계수, 항복강도, 인장강도 등이 여기에 해당합니다.

이 입력값이 부정확하면 해석 결과가 아무리 정교해도 신뢰하기 어렵습니다.

상부토압 산정식

관로 상부 연직 토압(고정하중) 산정식 (Marston's Formula for Loads on Underground Conduits)



$$W_v = \gamma_t H \quad (H \leq 2.0m)$$

$$W_v = C_d \gamma_t B \quad (H > 2.0m)$$

$$C_d = \frac{1 - e^{-2k\mu'(H/B)}}{2k\mu'}$$

$$k = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$$

$$\mu' = \tan \phi'$$

$$B = 2D + 100$$

기호	의미	비고
W_v	상부토압	kgf/cm ²
C_d	Marston 토압계수	H > 2.0 m일 때 적용
H	매설깊이	매뉴얼 단위 확인 필요
k	토압계수	Rankine 계수
μ'	마찰계수	$\tan \phi'$
ϕ	흙의 내부마찰각	지반시험 또는 지반조사값
ϕ'	매설토와 굴착면 마찰각	예시: $\phi' = \phi = 30^\circ$
γ_t	흙의 단위중량	예시: $1.8 \times 10^{-3} \text{kgf/cm}^3$
B	관 상부 굴착폭	$B = 2D + 100$

© MIDAS IT Co., Ltd

상부토압은 매설깊이와 지반조건에 따라 산정합니다.

여기서는 Marston 계수를 이용한 상부토압 산정식을 정리했습니다.

식에는 매설깊이, 토압계수, 마찰계수, 흙의 단위중량, 굴착폭 등이 사용됩니다.

주의할 점은 매설깊이 조건에 따라 적용식이 달라질 수 있다는 것입니다.

따라서 실제 검토에서는 최신 열수송관 안전진단 매뉴얼이나 발주처 기준에서 어떤 식을 적용해야 하는지 확인해야 합니다.

상부토압 예시 조건: 500

예시 값:

$$H = 2.070m = 207cm$$

$$D = 710mm = 71cm$$

$$B = 2D + 100 = 2(71) + 100 = 242cm$$

$$\phi = 30^\circ, \phi' = 30^\circ$$

$$\gamma_t = 1.8 \times 10^{-3} kgf/cm^3$$

계산

$$k = \frac{1 - \sin 30^\circ}{1 + \sin 30^\circ} = \frac{1 - 0.5}{1 + 0.5} = 0.333$$

$$\mu' = \tan 30^\circ = 0.577$$

$$\frac{H}{B} = \frac{207}{242} = 0.855$$

$$C_d = \frac{1 - e^{-2(0.333)(0.577)(0.855)}}{2(0.333)(0.577)}$$

$$C_d \approx 0.73$$

$$W_v = C_d \gamma_t B = 0.73(1.8 \times 10^{-3})(242)$$

$$W_v \approx 0.318 kgf/cm^2$$

단위 변환:

$$W_v \approx 0.318 kgf/cm^2 \times 98.0665 \approx 31.2 kN/m^2$$

이 슬라이드는 관경 500 예제에서 상부토압을 계산하는 흐름입니다.

여기에 들어가는 값들은 교육용 예제값입니다.

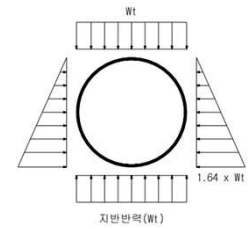
실제 현장에서는 흙의 단위중량, 내부마찰각, 굴착폭 등을 지반조사나 현장자료를 통해 확인해야 합니다.

여기서 계산한 상부토압은 뒤쪽 Civil NX 모델에서 매설토 하중으로 입력하게 됩니다.

차량하중 산정식

차륜하중에 의한 등가분포상재하중 식

$$W_t = \frac{2nP(1+i)}{\{nL + (n-1)C + b + 2H \tan \theta\}(a + 2H \tan \theta)}$$



기호	의미
W_t	차량에 의한 연직하중
P	후륜하중
n	고려 차량 수 또는 차륜 배열 수
L	후륜 중심간격
C	인접 차량 후륜 중심간격
b	후륜폭
a	차륜 접지폭
H	매설깊이
θ	Kögler 분산각
i	충격계수

차량하중 충격계수

매설깊이 조건	충격계수 (i)
$H < 1.5m$	0.5
$1.50m < H < 6.5m$	$0.65 - 0.10H$
$6.5m < H$	0

© MIDAS IT Co., Ltd

차량하중은 차량 후륜하중이 매설깊이를 통해 지중으로 분산되어 관에 작용한다고 보고 산정합니다.

여기에는 후륜하중, 차륜 간격, 접지폭, 매설깊이, 분산각, 충격계수 등이 들어갑니다.

실제 적용 시에는 어떤 차량하중 기준을 적용할지, 차량 배열을 어떻게 볼지에 따라 값이 달라질 수 있습니다.

따라서 차량하중도 기준과 현장조건을 먼저 확인한 뒤 적용해야 합니다.

차량하중 예시 조건: 500

예시 값:

$$H = 207cm$$

$$P = 9,600kgf$$

$$n = 1,$$

$$L = 175cm, C = 100cm, b = 50cm, a = 20cm$$

$$\theta = 45^\circ, i = 0.443$$

* n 값과 차량 배열 조건은 각 기준에 따라 달라짐

계산

$$2H \tan \theta = 2(207)(1) = 414cm$$

$$nL + (n - 1)C + b + 2H \tan \theta = 1(175) + 0 + 50 + 414 = 639cm$$

$$a + 2H \tan \theta = 20 + 414 = 434cm$$

$$W_t = \frac{2(1)(9,600)(1 + 0.443)}{639 \times 434}$$

$$W_t \approx 0.100kgf/cm^2$$

단위 변환:

$$W_t \approx 0.100kgf/cm^2 \times 98.0665 \approx 9.8kN/m^2$$

해당 예제에서는 차량하중을 계산한 뒤, Civil NX에서 수직 차량하중과 수직차량하중에 의한 측면 토압으로 나누어 입력합니다.

수직 차량하중은 관 상부와 하부 방향의 외압 거동을 재현하는 데 사용하고, 측면 토압은 관 측부에 작용하는 수평 압력으로 입력합니다.

여기서 차량 배열 수나 충격계수는 기준에 따라 달라질 수 있으므로, 실제 검토에서는 반드시 적용 기준을 명확히 해야 합니다.

외압에 의한 휨응력 산정식

매설관의 휨응력 산정식(Spangler's Bending Stress Formula)

$$\sigma_b = \frac{2}{fz} (W_v + W_t) \frac{K_b R^2 EI + (0.061K_b - 0.083K_x) E' R^5}{EI + 0.061E' R^3}$$

기호	의미	비고
σ_b	외압에 의한 발생 휨응력	kgf/cm^2 또는 MPa 변환
f	형상계수	예시: 1.5
z	단위폭당 단면계수	
W_v	상부토압	산정값
W_t	차량하중	산정값
K_b	관저부 휨모멘트 계수	지지각별 표
K_x	수평방향 변형계수	지지각별 표
R	관 평균반경	
E	강관 탄성계수	예시: $2.1 \times 10^6 kgf/cm^2$
I	단위폭당 단면2차모멘트	$t^3/12$
E'	흙의 반력계수	예시: 28 MPa

이 식은 토압과 차량하중에 의해 관벽에 발생하는 외압 휨응력을 산정하는 식입니다.

외압이 작용하면 관 단면이 찌그러지고, 그 결과 관벽에는 원주방향 휨응력이 발생합니다.

그래서 결과와 비교할 때도 단순히 von Mises 응력을 보는 것이 아니라, 원주방향 응력 값을 확인해야 합니다.

외압 휨응력 지지각별 계수

지지각	K_b	K_x	$0.061K_b - 0.083K_x$
60°	0.189	0.103	0.00307
90°	0.157	0.096	0.00171
120°	0.138	0.089	0.00107
150°	0.128	0.085	0.00082

오늘 예제에서는 지지각 90도를 적용합니다.

외압 휨응력 산정식에는 지지각별 계수가 들어갑니다.

지지각은 관 하부가 지반이나 받침재에 의해 어느 정도 범위로 지지되는지를 나타내는 값입니다.

지지각이 작으면 관 하부 지지가 좁기 때문에 휨응력이 커질 수 있고, 지지각이 커지면 하중이 더 넓게 분산되어 휨응력이 작아지는 경향이 있습니다.

이번 예제에서는 지지각 90도를 적용합니다.

외압 휨응력 예시 조건: 500, 지지각 90°

단면계수와 단면2차모멘트

$$z = \frac{t^2}{6}, z = \frac{0.64^2}{6} = 0.0683\text{cm}^2$$

$$I = \frac{t^3}{12}, I = \frac{0.64^3}{12} = 0.02185\text{cm}^3$$

외압 조건 예시

$$W_v = 0.318\text{kgf/cm}^2, W_t = 0.100\text{kgf/cm}^2, W_v + W_t = 0.418\text{kgf/cm}^2$$

지지각 90°일 때:

$$K_b = 0.157, K_x = 0.096, 0.061K_b - 0.083K_x = 0.00171$$

$$R = 25.08\text{cm}, z = 0.0683\text{cm}^2, I = 0.02185\text{cm}^3$$

$$W_v + W_t = \mathbf{0.418\text{kgf/cm}^2}$$

$$E = 2.1 \times 10^6\text{kgf/cm}^2, E' = 28\text{kgf/cm}^2$$

$$\frac{K_b R^2 EI + (0.061K_b - 0.083K_x) E' R^5}{EI + 0.061E' R^3} \approx 68.35\text{cm}^2$$

따라서,

$$\sigma_b = \frac{2}{1.5 \times 0.0683} (0.418)(68.35)$$

$$\sigma_b \approx \mathbf{558\text{kgf/cm}^2}$$

단위 변환:

$$\sigma_b \approx 558\text{kgf/cm}^2 \times 0.0980665 \approx \mathbf{54.7\text{MPa}}$$

이 슬라이드는 예제조건에서 외압 휨응력을 계산하는 예시입니다.

여기서 사용하는 단면계수와 단면2차모멘트는 전체 원형관 단면이 아니라, 관벽을 단위폭으로 본 값입니다.

즉, 관벽을 직사각형 단면처럼 보고, $z = \frac{t^2}{6}, I = \frac{t^3}{12}$ 를 사용합니다.

이 값은 나중에 Civil NX의 Top/Bottom 응력 차이로 계산한 휨응력 성분과 비교할 수 있습니다.

외압에 의한 좌굴하중

매설 연성관의 허용 좌굴 압력 공식 (Allowable Buckling Pressure Formula for Buried Flexible Pipes)

$$W = W_v + W_t$$

$$q_a = \frac{1}{FS} \left(32R_w B' E' \frac{EI}{D^3} \right)^{1/2}$$

$$B' = 0.15 + 0.041 \left(\frac{H}{D} \right)$$

$$FS = \begin{cases} 2.5, & H/D \geq 2.0 \\ 3.0, & H/D < 2.0 \end{cases}$$

기호	의미	비고
W	작용 연직하중	$W_v + W_t$
q_a	허용좌굴하중	작용 외압과 비교
FS	설계계수	H/D에 따라 결정
R_w	부력계수	예시: 1.0
B'	기초계수	$0.15 + 0.041(H/D)$
E'	흙의 반력계수	예시: 28 MPa
E	강관 탄성계수	재료값
I	단위폭당 단면2차모멘트	$t^3/12$
D	관 직경	
H	매설깊이	관상단 또는 관 중심 기준

$$W \leq q_a \Rightarrow \text{좌굴안정}$$

$$W > q_a \Rightarrow \text{좌굴 불안정 또는 재검토 필요}$$

© MIDAS IT Co., Ltd

외압 좌굴하중은 응력값과 직접 비교하는 값이 아닙니다.

이 식에서 구하는 것은 관이 외압에 대해 견딜 수 있는 허용 좌굴하중입니다.

검토는 단순합니다.

$W \leq q_a$ 이면 좌굴 안정입니다.

여기서 W 는 작용 외압이고, q_a 는 허용 좌굴하중입니다.

외압 좌굴하중 예시 계산: 500, $E'=28\text{ MPa}$

예시 값:

$$\frac{H}{D} = \frac{2070}{495.2} = 4.18$$

$$H/D \geq 2.0$$

따라서,

$$FS = 2.5$$

$$B' = 0.15 + 0.041(H/D)$$

$$B' = 0.15 + 0.041(4.18)$$

$$B' = 0.321$$

$$I = \frac{t^3}{12} \text{ (단위폭당 관벽 단면2차모멘트)}$$

$$I = \frac{6.4^3}{12} = 21.845\text{ mm}^3/\text{mm}$$

$$D = 495.2\text{ mm}, B' = 0.321, R_w = 1.0, FS = 2.5$$

계산

$$q_a = \frac{1}{2.5} \left(32 \times 1.0 \times 0.321 \times 28 \times \frac{210000 \times 21.845}{495.2^3} \right)^{1/2}$$

$$q_a \approx 1.32\text{ MPa}$$

작용 외압과 비교

앞선 500 매뉴얼식 예시에서,

$$W_v = 0.318\text{ kgf/cm}^2, W_t = 0.100\text{ kgf/cm}^2, W_v + W_t = W = 0.418\text{ kgf/cm}^2$$

단위 변환:

$$W = 0.418 \times 0.0980665 = 0.0410\text{ MPa}$$

따라서,

$$W = 0.0410\text{ MPa} < q_a = 1.32\text{ MPa}$$

⇒ 좌굴안정

이 슬라이드는 예시 조건에서 작용외압과 허용좌굴하중을 비교하는 예시입니다.

작용외압은 앞에서 계산한 토압과 차량하중의 합으로 봅니다.

좌굴하중은 관 두께, 관경, 매설깊이, 그리고 흙의 반력계수에 민감합니다.

내압응력 산정식

내압에 의한 원주방향 응력 (Barlow's Formula)

$$\sigma_p = \frac{PD}{2t}$$

기호	의미	단위
σ_p	내압에 의한 발생 원주응력	MPa
P	관내압력	MPa
D	관 내경	mm
t	관 두께	mm

내압응력 예시 계산: 500

예시 값:

$$P = 1.6 \text{ MPa}$$

$$D = 495.2 \text{ mm}$$

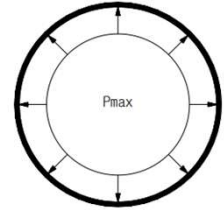
$$t = 6.4 \text{ mm}$$

계산

$$\sigma_p = \frac{1.6 \times 495.2}{2 \times 6.4}$$

$$\sigma_p = \frac{792.32}{12.8}$$

$$\sigma_p = 61.90 \text{ MPa}$$



© MIDAS IT Co., Ltd

내압응력은 얇은 원통관의 원주방향 응력식으로 계산합니다.

$$\sigma_p = \frac{PD}{2t}$$

500 조건에서 내압 1.6 MPa, 내경 495.2 mm, 두께 6.4 mm를 적용하면 약 61.9 MPa입니다.

결과 값에서 내압 조합의 원주방향 응력이 이 값과 유사하게 나오면, 내압 입력과 모델링이 적정하다고 볼 수 있습니다.

만약 값이 크게 다르면 내압 단위, 두께, 관경, 하중 방향, 요소좌표계를 다시 확인해야 합니다.

폐단 축응력과 곡관 추력

폐단 축응력 (Longitudinal Stress in Thin-Walled Pressure Vessels)

$$\sigma_L = \frac{PD}{4t}$$

폐단부 추력 (Total Hydrostatic Force)

$$F = PA$$

$$A = \frac{\pi D_i^2}{4}$$

곡관부 추력 (Resultant Force on a Pipe Bend by Momentum Equation)

$$F_b = 2PA \sin \frac{\theta}{2}$$

500 폐단 추력 예시

$$D_i = 0.4952m$$

$$A = \frac{\pi(0.4952)^2}{4} = 0.1926m^2$$

$$P = 1,600kN/m^2$$

$$F = 1,600(0.1926) = \mathbf{308.2kN}$$

90도 곡관

$$F_b = 2(308.2) \sin 45^\circ = \mathbf{435.8kN}$$

이 슬라이드는 참고 검토 항목입니다.

해당 모델은 기본 직관 Shell 모델이기 때문에 내압에 의한 원주방향 응력을 중심으로 확인합니다.

하지만 실제 배관계에서는 폐단 축응력, 곡관부 추력, 앵커반력도 중요합니다.

특히 곡관, 밸브실, 앵커블록, 이음부가 있는 경우에는 별도의 배관계 검토가 필요합니다.

온도응력 산정식

열응력(Thermal Stress) 공식 (Hooke's Law for Uniaxial Thermal Stress)

$$\sigma_t = E\alpha\Delta T$$

기호	의미	취득 방법
σ_t	온도에 의한 발생응력	계산값
E	강관 탄성계수	재료규격, 성적서
A	열팽창계수	재료 물성표
ΔT	온도변화량	설치온도, 예열온도, 운전온도

예시:

$$E = 210,000 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 55^\circ\text{C}$$

$$\sigma_t = 210,000(12 \times 10^{-6})(55) = 138.6 \text{ MPa}$$

이 식은 완전구속 상태의 온도응력 개념식이며, 실제 열수송관은 앵커, 가이드, 신축이음, 토사마찰, 예열조건에 따라 온도응력이 달라짐

온도응력은 관이 팽창하려는 것을 구속할 때 발생합니다.

완전구속 상태라면 $\sigma_t = E\alpha\Delta T$ 로 계산할 수 있습니다.

하지만 실제 열수송관은 앵커, 가이드, 신축이음, 토사마찰, 예열조건에 따라 응력이 달라집니다.

따라서 Civil NX에서는 온도하중을 입력한 뒤 축방향 응력, 축방향 변위, 반력을 함께 확인해야 합니다.

Civil NX

구조해석

Modeling Process in Civil NX

열수송관을 대상으로 단위계, 재료, Shell 모델, 지반스프링, 하중조건 및 하중조합을 구성하는 절차를 설명한다.

본 자료는 교육용 예제이며, 실제 설계·진단 적용 시에는 최신 「집단에너지시설의 기술기준」, 한국에너지공단 열수송관 안전진단 매뉴얼, 발주처 기준을 확인한다.

이제 Civil NX 모델링 단계로 넘어가겠습니다.

앞에서 설명한 하중과 계산식을 바탕으로, 열수송관을 Shell 모델로 구성하고 하중을 입력하는 절차를 보겠습니다.

이후 중요한 부분은 Civil NX 화면에서 직접 확인하면서 진행하겠습니다

CIVIL NX

구조해석

열 수송관 500 예제 조건

항목	값
관경	500
토피고	2.070 m
최대압력	1.60 MPa
강종	SS400
항복강도	245 Mpa
인장강도	400 MPa
탄성계수	210,000 MPa
강관 내경	495.2 mm
강관 외경	508.0 mm
강관 두께	6.4 mm
보온재 두께	82.4 mm
외피 외경	710.0 mm
적용규격	KS D 3562

* 실제 열수송관 적용 시 관 재료규격은 별도 확인

강관 내경은 495.2 mm, 외경은 508.0 mm이고, 두께는 6.4 mm입니다.

Shell 모델은 관벽의 중심면을 기준으로 생성하기 때문에, 반경은 외경이나 내경이 아니라 중심면 반경을 사용합니다.

중심면 지름은 내경 495.2 mm와 외경 508.0 mm의 평균이므로 501.6 mm이고, 중심면 반경은 250.8 mm입니다.

재료는 실습을 위해 Civil NX DB의 SS400을 사용합니다. 인장강도는 400 MPa, 항복강도는 245 MPa로 정리했습니다.

다만 실제 열수송관 검토에서는 반드시 관 재료규격과 재료성적서 기준 강도를 별도로 확인해야 합니다.

CIVIL NX

구조해석

Civil NX 모델링 전체 흐름

1. 단위계 설정
2. 재료 입력
3. Shell 두께 입력
4. Shell wizard
5. 요소좌표계 변환
6. 경계조건 설정
7. 지반스프링 또는 지반반력 설정
8. Load Case 생성
9. 자중 입력
10. 매설토압 입력
11. 차량하중 입력
12. 내압 입력
13. 온도하중 입력
14. 하중조합 구성
15. 경계 비선형 해석을 위한 하중조합의 하중조건 치환
16. 해석 수행

전체 모델링 흐름을 먼저 보겠습니다.

먼저 단위계를 설정하고, 재료와 Shell 두께를 입력합니다.

그 다음 Shell Wizard를 이용해서 원통형 Shell 모델을 생성합니다.

이후 요소좌표계를 확인하고, 필요하다면 요소 로컬축을 조정합니다.

그 다음 경계조건과 지반스프링을 설정합니다.

하중은 자중, 매설토하중, 차량하중, 내압, 온도하중 순서로 입력합니다.

마지막으로 하중조합을 구성한 뒤, 압축전담 스프링의 비선형 거동을 고려하기 위해 하중조합을 정적 하중케이스로 치환해서 해석합니다.

실제 작업은 이 순서대로 진행하겠습니다.

단위 설정

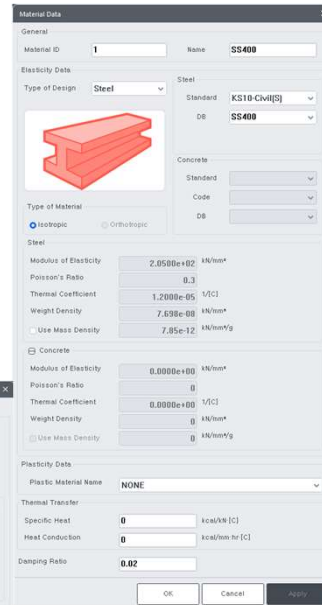
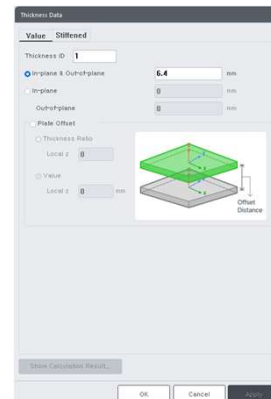
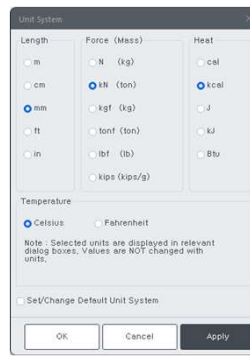
1. Length 입력란 ▶ mm
2. Force 입력란 ▶ kN (ton)
3. Heat 입력란 ▶ kcal
4. Temperature 입력란 ▶ Celsius
5. [OK] Click

재료 설정

1. Properties(Material) 대화창에서 [Add] 클릭
2. Elasticity Data: Type of Design ▶ Steel 선택
3. Steel 세부 항목: * Standard ▶ KS10-Civil(S)
 - DB ▶ SS400
4. [OK] 클릭

관 두께 설정

1. [Properties] → [Section Properties] 그룹 → [Thickness]
2. Properties(Thickness) 에서 [Add] 클릭
3. 상단의 [Value] 탭 선택
4. 두께 입력 : In-plane & Out-of-plane ▶ 6.4 mm 입력
5. [OK] 클릭



© MIDAS IT Co., Ltd

Civil NX 상단에서 단위계를 확인합니다.

형상 모델링 단계에서는 슬라이드와 같이 Length = mm, Force = kN, Temperature = Celsius 기준으로 진행합니다.

이제 재료를 입력합니다.

Civil NX 메뉴에서 Properties → Material 또는 Properties(Material) 창으로 들어갑니다.

여기서 Add를 클릭하고, Type of Design은 Steel, Standard는 KS10-Civil(S), DB는 SS400을 선택합니다.

다음으로 Shell 두께를 입력합니다.

메뉴는 Properties → Section Properties → Thickness입니다.

Add를 클릭하고, Value 탭에서 In-plane과 Out-of-plane 두께를 모두 6.4 mm로 입력합니다.

Shell 요소에서는 이 두께값이 응력 계산에 직접 반영되기 때문에, 단위와 값이 맞는지 반드시 확인해야 합니다.

CIVIL NX 구조해석

▶ **종횡비(Aспект Ratio)를 고려한 Mesh 분할 산정**
 l값을 정했을 때 짝수 m을 구하는 식:

$$m = 2 \times \text{Round} \left(l \times \frac{\pi R}{H} \right)$$

짝수 m값을 정했을 때 l을 구하는 식:

$$l = \text{Round} \left(m \times \frac{H}{2\pi R} \right)$$

Example

$$m = 2 \times \text{Round} \left(10 \times \frac{\pi \times 250.8}{1000} \right)$$

$$m = 2 \times \text{Round}(7.879)$$

$$m = 2 \times 8 = 16$$

※ 생성되는 요소(Mesh)의 크기 확인

• 길이 방향 (세로): $1000 / 10 = 100 \text{ mm}$

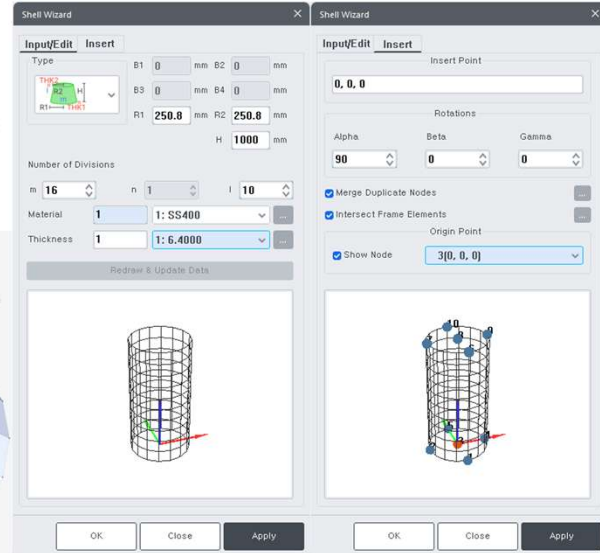
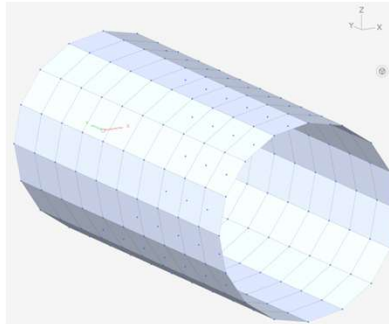
• 원주 방향 (가로): $(2 \times \pi \times 250.8) / 16 \approx 98.49 \text{ mm}$

※ 원주방향 분할은 원형성이 유지되도록 충분히 확보

※ 최대응력이 mesh에 민감하면 mesh 수렴성 검토

원통 Shell 생성

- [Structure] 탭 → [Base Model] 그룹 → [Base Structures] → [Shell]
- Shell Wizard 설정 (Input/Edit 탭)
 - Type: 원형 Shell (Cylindrical Shell 아이콘) 선택
 - Geometry (치수 입력): R1 = 250.8 mm, R2 = 250.8 mm, H = 1000 mm
 - Number of Divisions (요소 분할 수): m = 16, l = 10
- Material (재질): 1: SS400
- Thickness (두께): 1: 6.4000
- 배치 및 회전 설정 (Insert 탭)
 - Insert Point (삽입점): 0, 0, 0
 - Rotations (회전 각도): Alpha = 90, Beta = 0, Gamma = 0
- Origin Point (기준 점): Show Node 옵션 체크, 3(0, 0, 0)
- 실행[OK] 클릭



이제 원통형 Shell을 생성합니다.

메뉴는 Structure 탭 → Base Model 그룹 → Base Structures → Shell입니다.

여기서 Shell Wizard 창이 열리면, 먼저 원형 Shell, 즉 Cylindrical Shell 아이콘을 선택합니다.

Input/Edit 탭에서 형상을 입력합니다.

Geometry 값은 다음과 같습니다.

R1 = 250.8 mm, R2 = 250.8 mm, H = 1000 mm입니다.

여기서 R1과 R2는 관 중심면 반경이고, H는 모델 길이입니다.

다음으로 요소 분할 수를 입력합니다.

원주방향 분할 수 m = 16, 길이방향 분할 수 l = 10을 입력합니다. 요소 분할에 대한 팁은 좌측에 메모를 확인해주시기 바랍니다.

재료는 앞에서 만든 SS400, 두께는 6.4 mm 두께 속성을 선택합니다.

Insert 탭에서는 삽입점을 0, 0, 0으로 두고, 회전각은 슬라이드 기준으로 Alpha = 90, Beta = 0, Gamma = 0을 입력합니다.

여기서 모델 방향이 달라지면 나중에 하중 방향도 달라질 수 있으므로, 생성 후 반드시 모델 방향을 확인해야 합니다.

마지막으로 OK를 눌러 Shell을 생성합니다.

Mesh는 가능하면 정사각형에 가깝게 구성하는 것이 좋습니다.

이번 예제에서는 길이방향 요소 크기가 100 mm이고, 원주방향 요소 길이도 이와 유사하도록 분할 수를 정했습니다.

응력 결과가 mesh에 민감하게 나타나면, 원주방향과 길이방향 분할 수를 늘려서 mesh 수렴성도 확인해야 합니다.

CIVIL NX 구조해석

요소 전체 선택 Hot Key

Select All = ctrl + shift + A

Display 설정 Hot Key

Display = ctrl + E

Display Option = alt + E

View Point Control Hot Key

Front View = ctrl + shift + F

Top View = ctrl + shift + T

Right View = ctrl + shift + R

LEFT View = ctrl + shift + L

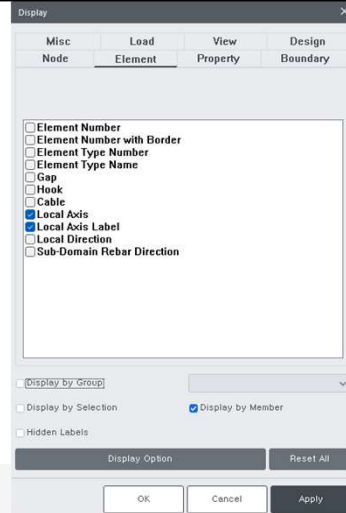
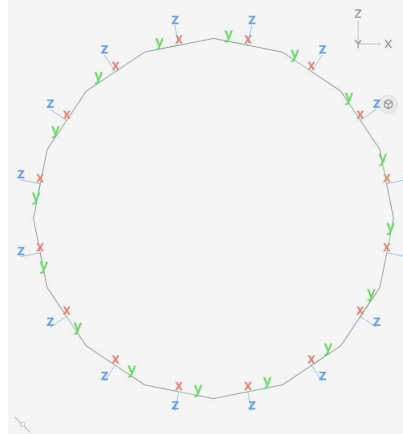
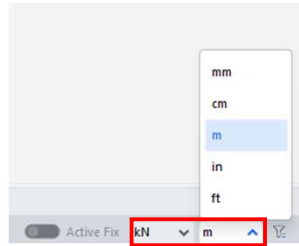
ISO View = ctrl + shift + I

요소 좌표계 변환

1. 단축키: [Ctrl] + [E] (Display)
2. 설정 항목:
 - [Element] 탭 선택
 - Local Axis 체크 (요소 로컬 축 표시)
 - Local Axis Label 체크 (요소 로컬 축 라벨 표시)
3. 단축키: [Ctrl] + [Shift] + [A]
4. [Node/Element] 탭 → [Element Detail] 그룹 → [Change Element Parameters]
5. Change Element Parameters 설정:
 - Parameter Type: (●) Reverse Element Local
 - Mode - Element Type: (●) Planar
6. 실행: [Apply] 클릭

단위 변환

1. mm → m



Shell 모델을 생성한 뒤에는 요소좌표계를 확인합니다.

먼저 단축키 Ctrl + E를 눌러 Display 창을 엽니다.

Element 탭에서 Local Axis와 Local Axis Label을 체크합니다.

그러면 각 요소의 local x, y, z 방향을 화면에서 확인할 수 있습니다.

이번 모델에서는 local x 방향이 관 길이방향, local y 방향이 원주방향이 되도록 설정합니다.

따라서 결과분석에서 내압과 외압의 원주방향 응력은 Sig-yy로 확인하게 됩니다.

만약 요소 법선 방향이나 local axis 방향이 의도와 다르다면, 요소 로컬축을 반전해야 합니다.

이때 메뉴는 Node/Element 탭 → Element Detail 그룹 → Change Element Parameters입니다.

또는 단축키로 전체 요소를 선택한 뒤, Change Element Parameters에서 Parameter Type = Reverse Element Local, Mode = Planar를 선택하고 Apply를 누릅니다.

이 단계에서 반드시 확인해야 할 것은 두 가지입니다.

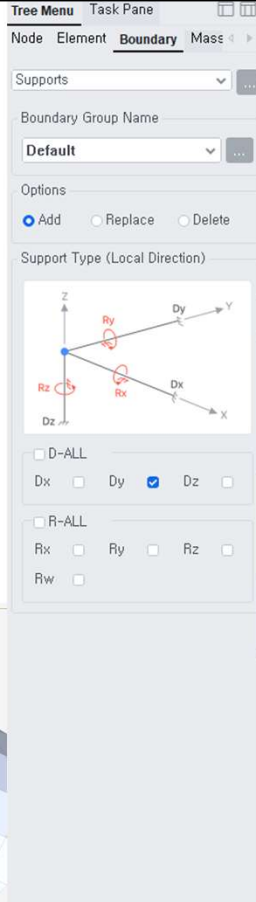
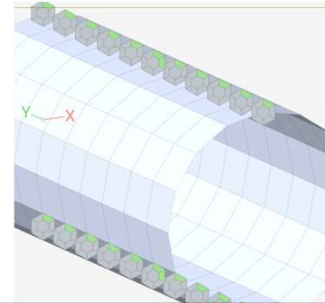
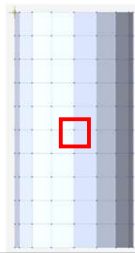
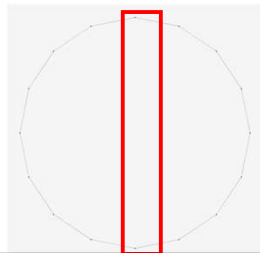
첫째, local y가 원주방향인지, 둘째, local z가 관의 안쪽 또는 바깥쪽 중 어느 방향을 향하는지입니다.

local z 방향은 내압 입력 방향과 직접 연결되기 때문에, 뒤에서 내압 하중 화살표를 다시 확인하겠습니다.

그리고 이 시점에서 하중 입력을 위해 단위를 mm 기준에서 m 기준으로 전환하겠습니다.

경계조건 설정(Define Supports)

- [Boundary] 탭 → [Supports] 그룹 → [Define Supports]
- 횡방향(Dx) 병진 자유도 구속 (횡방향 강체 이동 및 회전 거동 방지)
 - 세부 설정(Supports 창)
 - 원통형 단면의 수직 대칭축 상에 위치한 최상단 및 최하단 절점 선택 (Dx 병진 방향 절점 전부)
 - Boundary Group Name: Default
 - Options: (●) Add
 - Support Type: Dx 체크 (☑) (X축 방향 병진 자유도 구속)
 - 실행: [Apply] 클릭
- 종방향(Dy) 병진 자유도 구속 (모델의 종방향(축 방향) 강체 이동 방지 및 길이 방향의 대칭적 변형 유도)
 - 세부 설정 (Supports 창):
 - 원통형 쉘의 길이 방향 정중앙 단면에 위치한 최상단 및 최하단(X축 대칭) 절점 2개 선택
 - Options: (●) Add
 - Support Type: Dy 체크 (☑) (Y축 방향 병진 자유도 구속) (이전의 Dx는 체크 해제)
 - 실행: [OK] 클릭



이제 경계조건을 설정합니다.

메뉴는 Boundary 탭 → Supports 그룹 → Define Supports입니다.

먼저 횡방향 강체이동을 방지하기 위해, 원통 단면의 길이방향으로 최상단과 최하단 절점에 Dx를 구속합니다.

Supports 창에서 Boundary Group Name = Default, Options = Add,

Support Type = Dx를 체크하고 Apply를 누릅니다.

다음으로 길이방향 강체이동을 방지하기 위해, 모델 길이방향 중앙부의 특정 절점에 Dy를 구속합니다.

이때 Dy를 체크한 뒤 적용합니다.

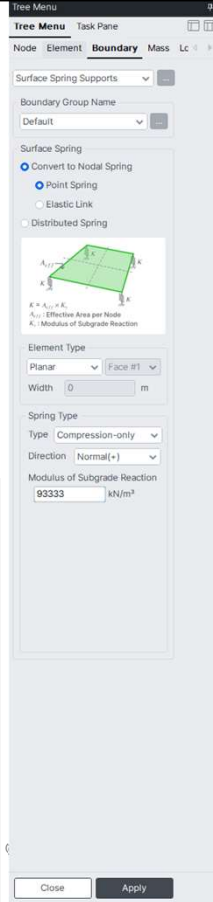
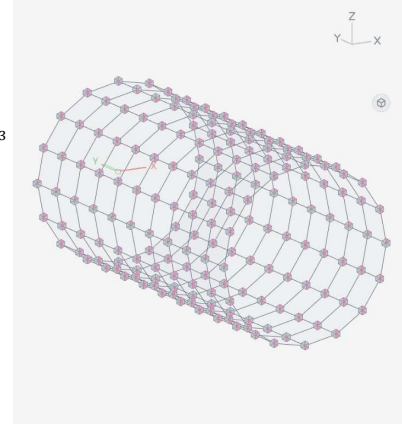
여기서 중요한 점은 과구속을 피하는 것입니다.

강체이동을 막기 위한 최소 구속만 주어야 합니다.

이번 예제에서는 기본 모델의 안정성을 확보하기 위한 최소 구속으로 이해하시면 됩니다.

경계조건 설정 (Surface Spring)

1. 요소 선택
 - [Ctrl] + [Shift] + [A]: 모델링 영역의 모든 요소 전체 선택
2. [Boundary] 탭 → [Springs] 그룹 → [Surface Spring] 클릭
3. Surface Spring Supports 설정
 - Boundary Group Name: Default (기본값)
 - Spring 적용 방식:
 - (●) Convert to Nodal Spring 선택 (면 스프링을 절점 스프링으로 변환)
 - (●) Point Spring 선택
 - Element Type (요소 타입): Planar / Face #1 선택
 - Spring Type (스프링 특성):
 - Type: Compression-only (압축 전용 스프링)
 - Direction: Normal(+) (면의 법선 방향)
 - 지반 반력 계수 입력:
 - Modulus of Subgrade Reaction: 93333 kN/m³



다음은 지반스프링 설정입니다.

메뉴는 Boundary 탭 → Springs 그룹 → Surface Spring입니다.

먼저 전체 요소를 선택합니다.

단축키 Ctrl + Shift + A를 사용하면 모델의 모든 요소를 선택할 수 있습니다.

Surface Spring Supports 창에서 Boundary Group Name = Default로 두고, Spring 적용 방식은 Convert to Nodal Spring을 선택합니다.

Spring Type에서는 Type = Compression-only, Direction = Normal(+)를 선택합니다.

그리고 지반반력계수는 Modulus of Subgrade Reaction = 93333을 입력합니다.

여기서 압축전용 스프링을 사용하는 이유는 지반이 압축에는 저항하지만 인장에는 저항하지 못하기 때문입니다.

CIVIL NX

구조해석

Static Load Cases에서 TYPE 찾기 요령

키보드 영문 전환

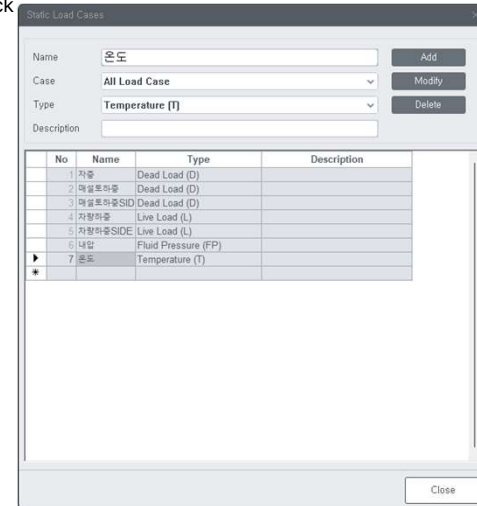
Ex) Temperature

Type 옵션을 드롭다운 → 키보드 T 입력

T로 시작하는 Type 선택됨.

정적 하중 케이스(Static Load Cases) 정의

- [Load] 탭 → [Create Load Cases] 그룹 → [Static Load Cases]
- 하중 케이스 입력 (Static Load Cases 대화창)
 - Name 입력란 ▶ 자중 | Type 선택란 ▶ Dead Load (D) → [Add] Click
 - Name 입력란 ▶ 매설토하중 | Type 선택란 ▶ Dead Load (D) → [Add] Click
 - Name 입력란 ▶ 매설토하중SIDE | Type 선택란 ▶ Dead Load (D) → [Add] Click
 - Name 입력란 ▶ 차량하중 | Type 선택란 ▶ Live Load (L) → [Add] Click
 - Name 입력란 ▶ 차량하중SIDE | Type 선택란 ▶ Live Load (L) → [Add] Click
 - Name 입력란 ▶ 내압 | Type 선택란 ▶ Fluid Pressure (FP) → [Add] Click
 - Name 입력란 ▶ 온도 | Type 선택란 ▶ Temperature (T) → [Add] Click
- [Close] Click



이제 하중 케이스를 생성합니다.

메뉴는 Load 탭 → Create Load Cases 그룹 → Static Load Cases입니다.

여기서 각 하중을 별도 Load Case로 생성합니다.

자중은 Dead Load, 매설토하중은 Dead Load, 매설토하중SIDE도 Dead Load, 차량하중은 Live Load, 차량하중SIDE도 Live Load, 내압은 Fluid Pressure,

온도는 Temperature로 생성합니다.

하중을 이렇게 분리해 두는 이유는 결과분석에서 내압 조건, 외압 조건, 온도 조건을 따로 확인하기 위해서입니다.

CIVIL NX 구조해석

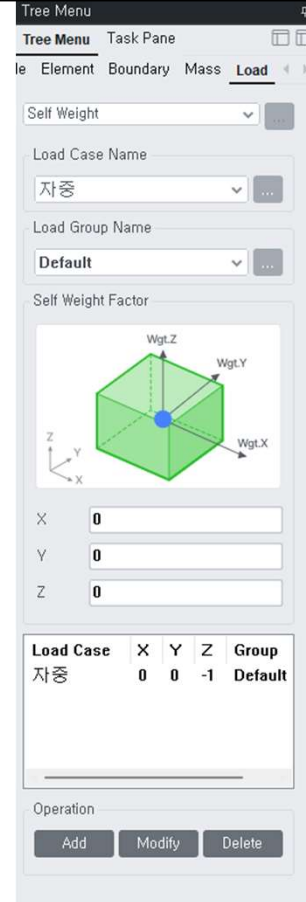
열수송관(이중보온관) 자중 적용 시 주의사항

현재 모델링된 Shell 요소는 '강관(SS400)' 재질만 입력된 상태입니다. 따라서 프로그램에서 $Z = -1$ 을 입력하면 순수하게 강관의 무게만 자중으로 계산됩니다. 실제 열수송관의 구성 요소인 보온재(PUR)와 외관(HDPE)의 무게까지 해석에 반영하려면 실무적으로 다음 두 가지 방법 중 하나를 적용해야 합니다.

- 환산 계수 적용 : (관 전체 무게 / 강관 단위 무게)의 비율을 계산하여 Z값을 -1보다 크게 입력합니다. (예: 전체 무게가 강관의 1.15배라면 $Z = -1.15$ 입력)
- 추가 하중 재하: 보온재와 HDPE의 단위 길이당 무게를 따로 계산하여, 추가적인 선하중(Line Load)이나 압력하중(Pressure Load)으로 모델에 재하합니다.

자중(Self Weight)

- [Load] 탭 → [Static Loads] 그룹 → [Self Weight]
- 세부 설정
 - Load Case Name: 자중
 - Load Group Name: Default
 - Self Weight Factor (자중 계수):
 - X: 0
 - Y: 0
 - Z: -1 (연직방향)
 - [Add] 클릭



자중을 입력하겠습니다.

메뉴는 Load 탭 → Static Loads 그룹 → Self Weight입니다.

Self Weight 창에서 Load Case Name = 자중, Load Group Name = Default로 설정합니다.

Self Weight Factor는 $X = 0$, $Y = 0$, $Z = -1$ 을 입력합니다.

Z 방향으로 -1을 입력하는 이유는 자중이 연직 방향으로 작용하기 때문입니다.

다만 현재 Shell 모델은 강관만 모델링한 상태입니다.

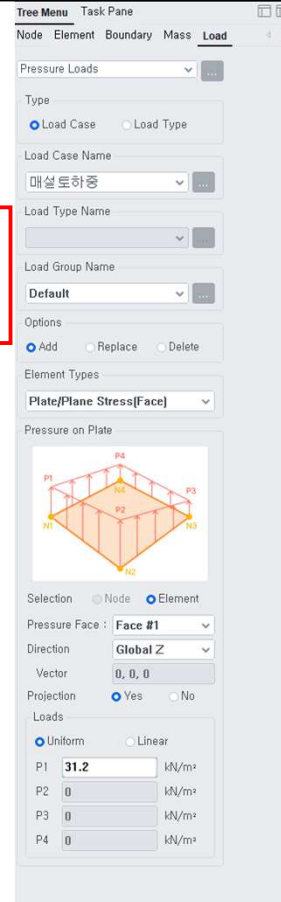
따라서 이 자중은 강관의 자중만 반영합니다.

실제 이중보온관에서는 보온재와 외피, 경우에 따라 관내수 중량까지 고려해야 할 수 있습니다.

이 경우에는 전체 중량을 환산해서 Self Weight Factor를 조정하거나, 별도의 선하중 또는 압력하중으로 추가할 수 있습니다.

매설토 하중 (수직 토압 및 반력)-상단

- [Load] 탭 → [Static Loads] 그룹 → [Pressure Loads] → [Assign Pressure Loads]
- STEP 1: 상단 매설토 하중 (수직 토압) 재하
 - 요소 선택: 원통의 상단 절반(Top Half)구역 요소 선택
 - 세부 설정 (Pressure Loads 창):
 - Load Case Name: 매설토하중
 - Load Group Name: Default
 - Options: (●) Add
 - Element Types: Plate/Plane Stress(Face)
 - Selection: (●) Element
 - Pressure Face: Face #1
 - Direction: Global Z (전체 좌표계 Z축 방향)
 - Projection: (●) Yes (원형 면적에 수직으로 투영하여 하중 적용)
 - 하중 값 입력:
 - Loads: (●) Uniform
 - P1: -31.2 kN/m^2 (아래를 향하므로 마이너스 값 입력)
 - 실행: [Apply] 클릭



이제 매설토하중을 입력합니다.

상단 수직토압은 Pressure Load로 입력합니다.

메뉴는 Load 탭 → Static Loads 그룹 → Pressure Loads → Assign Pressure Loads입니다.

먼저 원통의 상단 절반 요소를 선택합니다.

Pressure Loads 창에서 Load Case Name = 매설토하중, Options = Add, Element Types = Plate/Plane Stress(Face), Selection = Element,

Pressure Face = Face #1을 선택합니다.

Direction은 Global Z로 설정하고, Projection = Yes를 선택합니다.

하중값은 Uniform으로 두고, P1 = -31.2 를 입력합니다.

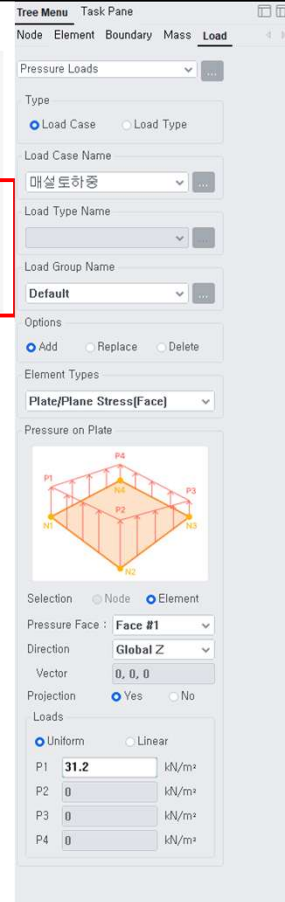
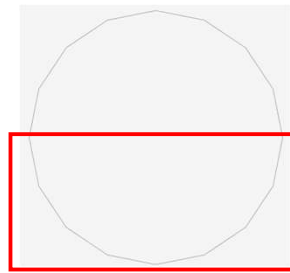
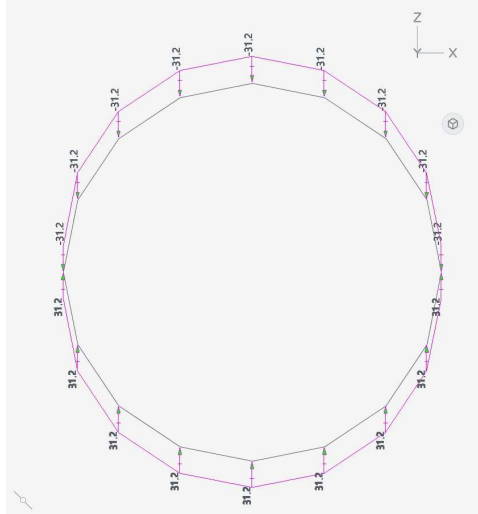
음수로 입력하는 이유는 하중이 아래 방향으로 작용하기 때문입니다.

입력 후에는 하중 화살표가 실제로 관 상단에서 아래 방향으로 작용하는지 확인합니다.

매설토 하중 (수직 토압 및 반력)-하단

3. STEP 2: 하단 매설토 하중 (지반 반력) 재하

- 요소 선택: 원통의 하단 절반(Bottom Half) 구역 요소 선택
- 세부 설정:
 - 나머지 설정은 위와 동일하게 유지합니다.
- 하중 값 입력:
 - P1: 31.2 kN/m^2 (위로 밀어 올리는 지반 반력이므로 플러스 값 입력)
- 실행: [Apply] 클릭



다음은 하단부 반력 방향 하중입니다.

같은 Pressure Loads 창에서 하단 절반 요소를 선택합니다.

설정은 앞 슬라이드와 동일하게 유지하고, 하중값만 $P1 = +31.2$ 로 입력합니다.

양수로 입력하는 이유는 하단부에서 위쪽으로 밀어 올리는 방향이기 때문입니다.

이 입력은 계산서 예제의 외압 휨거동을 재현하기 위한 방식입니다.

다만 지반스프링을 함께 사용하는 경우, 하부 반력하중과 지반스프링 반력이 중복되지 않는지 검토 목적을 명확히 해야 합니다.

오늘 예제에서는 계산값과 비교하기 위해 외압 분포를 재현하는 입력으로 이해하시면 됩니다.

CIVIL NX 구조해석

Hydrostatic Pressure 입력 변수

$$P = P_0 + g \times (H - h)$$

- **P:** 특정 위치(z)에서의 최종 하중 값
- **P₀ (Constant Intensity):** 기준 높이에서의 초기 하중 값
- **H (Reference Level):** 하중 분포의 기준이 되는 높이 좌표
- **g (Gradient Intensity):** 높이 변화에 따른 하중의 증감률 (기울기)
- **h:** 하중을 계산하려는 현재 노드의 Z 좌표 (높이)

상단 좌측 구역 증감률 계산

$$31.2 = 0 + g \times (0.2508 - 0)$$

$$31.2 = g \times 0.2508$$

$$g = 124.40$$

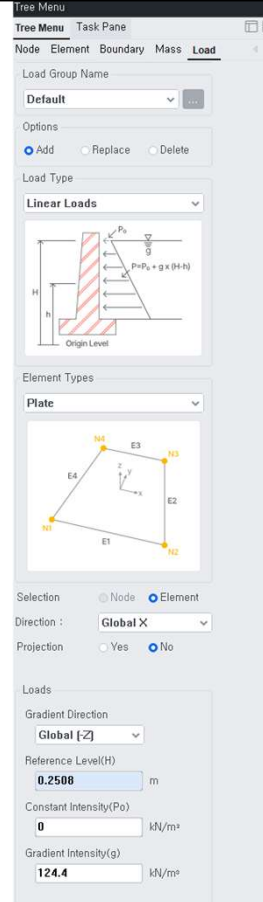
H (Reference Level) 입력 방법

Z 좌표 수치를 직접 입력하거나, 입력란을 활성화한 상태로 작업 화면(Model View)에서 기준이 되는 점점(Node)을 마우스로 클릭하여 자동으로 값을 불러올 수 있습니다.



측면 매설토 하중 (Hydrostatic Pressure)

1. [Load] 탭 → [Static Loads] 그룹 → [Hydrostatic Pressure Loads]
2. 공통 설정:
 - Load Case Name: 매설토하중SIDE
 - Options: (●) Add
 - Load Type: Linear Loads
 - Element Types: Plate
 - Selection: (●) Element
 - Direction: Global X
 - Projection: (●) Yes
 - Gradient Direction: Global (-Z)
3. STEP 1: 상단 좌측 (Top-Left) 재하
 - 요소 선택: 원통의 좌측 상단 1/4 구역 선택
 - 하중 값 입력:
 - Reference Level (H): 0.2508 m (관의 최상단 기준)
 - Constant Intensity (P₀): 0 kN/m²
 - Gradient Intensity (g): 124.40kN/m³
 - 실행: [Apply] 클릭



측면 매설토하중은 Hydrostatic Pressure Loads 기능을 이용합니다.

메뉴는 Load 탭 → Static Loads 그룹 → Hydrostatic Pressure Loads입니다.

공통 설정은 다음과 같습니다.

Load Case Name = 매설토하중SIDE, Load Type = Linear Loads, Element Types = Plate, Selection = Element, Direction = Global X, Projection = Yes, Gradient Direction = Global (-Z)로 설정합니다.

이 슬라이드는 좌측 상단 1/4 구역에 하중을 입력하는 단계입니다.

Reference Level은 관의 최상단 좌표를 기준으로 설정하고, Constant Intensity는 0으로 둡니다.

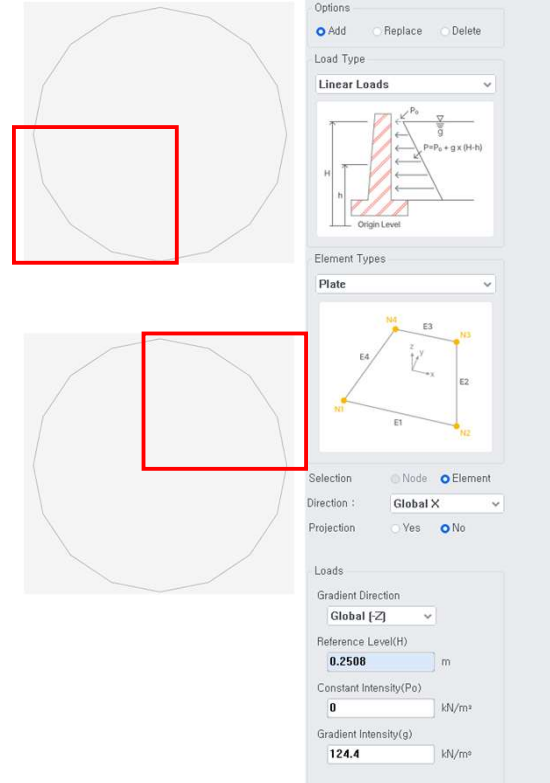
Gradient Intensity는 높이에 따라 증가하는 측면토압 기울기값(124.40)을 입력합니다.

측면토압은 좌우에서 방향이 반대이므로, 구역별로 부호를 정확히 입력해야 합니다.

입력 후에는 하중 화살표가 관 중심 방향으로 작용하는지 반드시 확인합니다.

측면 매설토 하중 (Hydrostatic Pressure)

4. STEP 2: 하단 좌측 (Bottom-Left) 재하
 - 요소 선택: 원통의 좌측 하단 1/4 구역 선택
 - 하중 값 입력:
 - Reference Level (H): 0 m (관의 정중앙 기준)
 - Constant Intensity (P_0): 31.2 kN/m^2
 - Gradient Intensity (g): -124.40 kN/m^3
 - 실행: [Apply] 클릭
5. STEP 3: 상단 우측 (Top-Right) 재하
 - 요소 선택: 원통의 우측 상단 1/4 구역 선택
 - 하중 값 입력:
 - Reference Level (H): 0.2508 m (관의 최상단 기준)
 - Constant Intensity (P_0): 0 kN/m^2
 - Gradient Intensity (g): -124.40 kN/m^3
 - (반대 방향이므로 마이너스)
 - 실행: [Apply] 클릭



이어서 좌측 하단과 우측 상단 구역에 측면토압을 입력합니다.

좌측 하단은 관 중심 기준으로 Reference Level을 조정하고, 하중이 좌측에서 우측 방향으로 작용하도록 입력합니다.

우측 상단은 방향이 반대입니다.

따라서 같은 크기의 하중이라도 Gradient Intensity 부호가 달라질 수 있습니다.

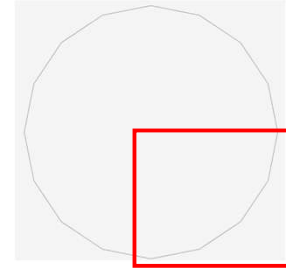
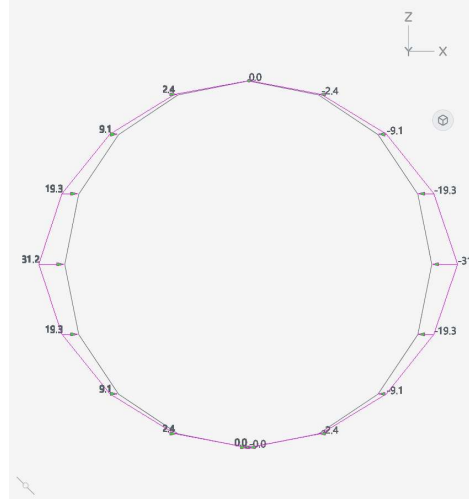
이 단계에서 실수하기 쉬운 부분은 부호입니다.

좌측과 우측 모두 관 중심 방향으로 미는 형태가 되어야 하므로, 입력 후 모델 화면에서 하중 방향을 반드시 확인합니다.

측면 매설토 하중 (Hydrostatic Pressure)

5. STEP 4: 하단 우측 (Bottom-Right) 재하

- 요소 선택: 원통의 우측 하단 1/4 구역 선택
- 하중 값 입력:
 - Reference Level (H): 0 m (관의 정중앙 기준)
 - Constant Intensity (P_0): -31.2 kN/m^2 (반대 방향이므로 마이너스)
 - Gradient Intensity (g): 124.40 kN/m^3
- 실행: [OK] 클릭



Tree Menu Task Pane

Node Element Boundary Mass Load

Load Group Name: Default

Options: Add Replace Delete

Load Type: Linear Loads

Diagram: A diagram showing a vertical pipe section with a coordinate system (X, Y, Z). The origin level is at the bottom. The pressure distribution is shown as a linear load with a constant intensity P_0 and a gradient intensity g . The total pressure at the top is $P = P_0 + g \times (H + h)$.

Element Types: Plate

Diagram: A diagram showing a plate element with nodes E1, E2, E3, E4 and nodes N1, N2, N3, N4.

Selection: Node Element

Direction: Global X

Projection: Yes No

Loads

Gradient Direction: Global [Z]

Reference Level(H): 0.2508 m

Constant Intensity(P_0): 0 kN/m²

Gradient Intensity(g): 124.4 kN/m³

마지막으로 우측 하단 구역에 측면토압을 입력합니다.

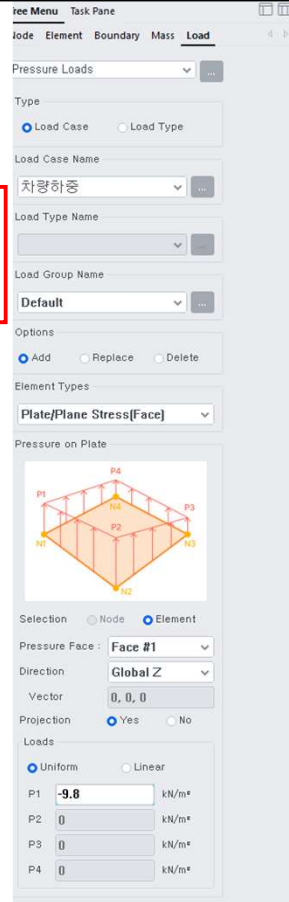
우측 하단은 관 중심 기준으로 Reference Level을 설정하고, 우측에서 좌측 방향으로 하중이 작용하도록 부호를 설정합니다.

이렇게 네 구역을 모두 입력하면 측면 매설토하중이 완성됩니다.

Hydrostatic Pressure는 기준 높이와 기울기값에 따라 하중 분포가 달라지기 때문에, 입력값만 보고 끝내지 말고 하중 화살표와 분포 형상을 함께 확인하는 것이 중요합니다.

차량 하중 (수직 상/하단)

- [Load] 탭 → [Static Loads] 그룹 → [Pressure Loads]
- STEP 1: 상단 차량하중 재하
 - 요소 선택: 원통의 상단 절반(Top Half) 구역 요소 선택
 - 세부 설정 (Pressure Loads 창):
 - Load Case Name: 차량하중
 - Load Group Name: Default
 - Options: (●) Add
 - Element Types: Plate/Plane Stress(Face)
 - Selection: (●) Element
 - Pressure Face: Face #1
 - Direction: Global Z (전체 좌표계 Z축 방향)
 - Projection: (●) Yes (원형 면적에 수직으로 투영하여 하중 적용) 하중 값 입력:
 - 하중 값 입력:
 - Loads: (●) Uniform
 - P1: -9.8 kN/m^2 (아래를 향하므로 마이너스 값 입력)
 - 실행: [Apply] 클릭



다음은 차량하중입니다.

수직 차량하중은 매설토하중과 마찬가지로 Pressure Loads 기능을 사용합니다.

메뉴는

Load 탭 → Static Loads 그룹 → Pressure Loads → Assign Pressure Loads입니다.

관 상단 절반 요소를 선택하고, Load Case Name = 차량하중으로 설정합니다.

Direction = Global Z, Projection = Yes, Loads = Uniform으로 설정합니다.

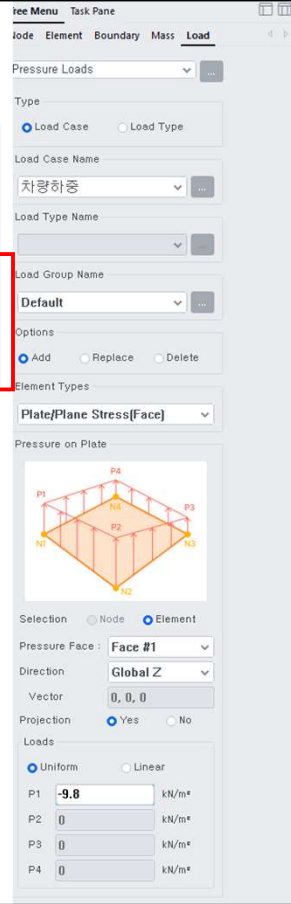
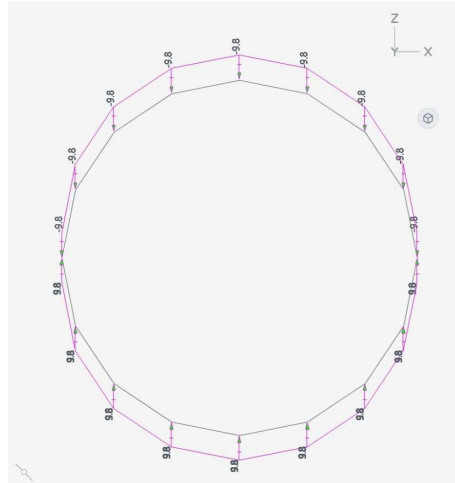
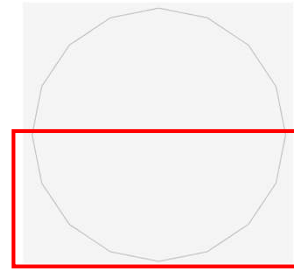
하중은 아래 방향으로 작용하므로 P1에는 -9.8 을 입력합니다.

입력 후 차량하중이 관 상부에서 아래 방향으로 작용하는지 확인합니다.

차량 하중 (수직 상/하단)

3. STEP 2: 하단 차량하중 (지반 반력) 재하

- 요소 선택: 원통의 하단 절반(Bottom Half) 구역 요소 선택
- 세부 설정:
 - (Load Case 등 나머지 설정은 동일하게 유지)
- 하중 값 입력:
 - P1: 9.8 kN/m^2 (위로 밀어 올리는 반력이므로 플러스)
- 실행: [Apply] 클릭



하단 차량하중은 반력 방향으로 입력합니다.

관 하단 절반 요소를 선택하고, 앞에서 사용한 Pressure Load 설정을 유지합니다.

하중값은 위쪽 방향이므로 양수값으로 입력합니다.

이 단계 역시 외압 거동을 계산에 맞춰 재현하기 위한 입력입니다.

입력 후에는 상부는 아래 방향, 하부는 위 방향으로 하중이 들어갔는지 확인합니다.

CIVIL NX 구조해석

차량 하중에 의한 측면 토압

차량 하중에 의한 측면 토압 (W'_f): 관의 최하단에서 작용하는 차량 하중에 의한 최대 측면 토압 하중

$$W'_f = W_t \times 1.64 = 9.8 \times 1.64 = 16.072 \text{ kN/m}^2$$

Hydrostatic Pressure 입력 변수

$$P = P_0 + g \times (H - h)$$

• P : 특정 위치(z)에서의 최종 하중 값

• P_0 (Constant Intensity): 기준 높이에서의 초기 하중 값

• H (Reference Level): 하중 분포의 기준이 되는 높이 좌표

• g (Gradient Intensity): 높이 변화에 따른 하중의 증감률 (기울기)

• h : 하중을 계산하려는 현재 노드의 Z 좌표 (높이)

좌측 구역 증감률 계산

$$16.072 = 0 + g \times (0.5016 - 0)$$

$$16.072 = g \times 0.5016$$

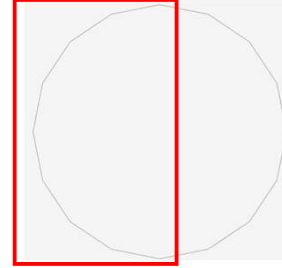
$$g = 32.041$$

차량 하중 (수평)

1. [Load] 탭 → [Static Loads] 그룹 → [Hydrostatic Pressure Loads]

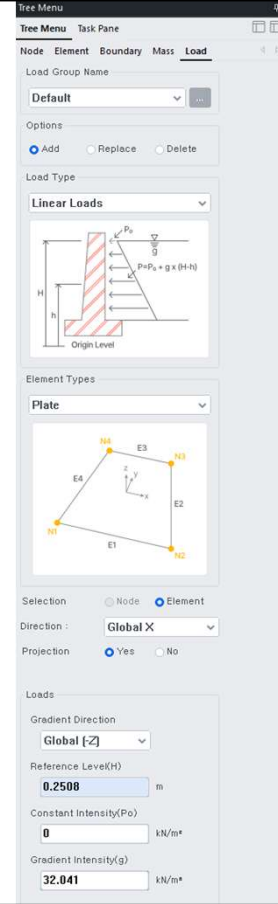
2. 공통 설정:

- Load Case Name: 차량하중SIDE
- Load Group Name: Default
- Load Type: Linear Loads
- Element Types: Plate
- Selection: (●) Element
- Direction: Global X
- Projection: (●) Yes
- Gradient Direction: Global (-Z)
- Reference Level (H): 0.2508 m (관의 최상단 좌표 기준)
- Constant Intensity (P_0): 0 kN/m^2 (상단에서는 하중이 0)



3. STEP 1: 좌측 측면 (Left Half) 재하

- 요소 선택: 원통의 좌측 절반(Left Half) 구역 전체 요소 선택
- 하중 값 입력:
 - Gradient Intensity (g): 32.041 kN/m^3 (플러스 값: 좌측에서 우측(+X)으로 미는 방향)
- 실행: [Apply] 클릭



차량하중에 의한 측면토압은 Hydrostatic Pressure Loads로 입력합니다.

메뉴는 Load 탭 → Static Loads 그룹 → Hydrostatic Pressure Loads입니다.

Load Case Name = 차량하중SIDE로 설정하고, Load Type = Linear Loads, Direction = Global X, Gradient Direction = Global (-Z)로 설정합니다.

좌측 절반 요소를 선택하고, Reference Level은 관의 최상단 좌표를 기준으로 둡니다.

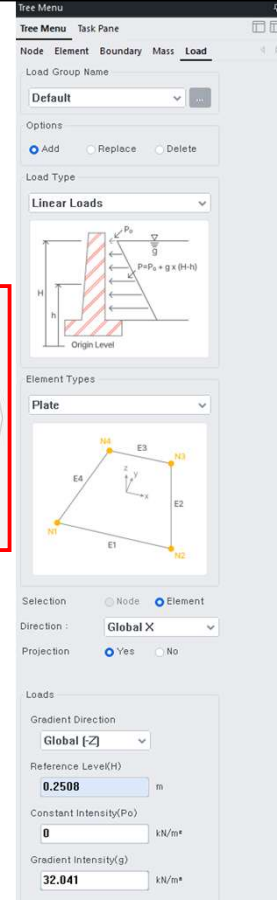
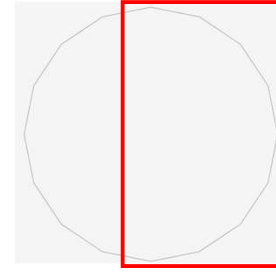
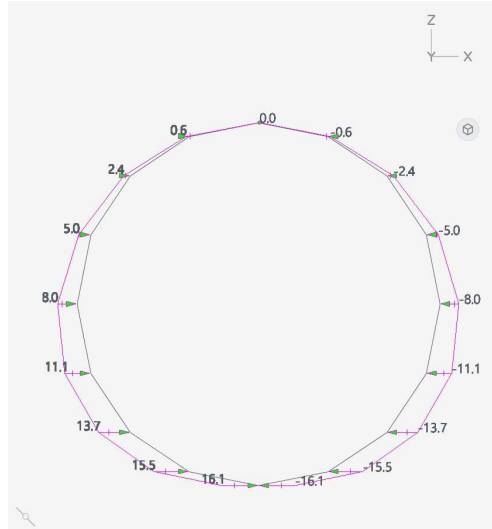
상단에서는 측면 차량하중이 0이고, 하단으로 갈수록 증가하는 형태이므로 Constant Intensity는 0으로 두고 Gradient Intensity 32.041을 입력합니다.

좌측에서는 하중이 관 중심 방향, 즉 +X 방향으로 작용해야 합니다.

차량 하중 (수평)

4. STEP 2: 우측 측면 (Right Half) 재하

- 요소 선택: 원통의 우측 절반(Right Half) 구역 전체 요소 선택
- 하중 값 입력:
 - Gradient Intensity (g): -32.041 kN/m^3 (마이너스 값: 우측에서 좌측(-X)으로 미는 방향)
- 실행: [Apply] 클릭



이번에는 우측 측면 차량하중입니다.

우측 절반 요소를 선택하고, 설정은 동일하게 유지합니다.

다만 방향이 반대이므로 Gradient Intensity의 부호를 반대로 -32.041 을 입력합니다.

우측에서는 하중이 관 중심 방향, 즉 $-X$ 방향으로 작용해야 합니다.

측면하중은 부호 오류가 매우 자주 발생합니다.

따라서 좌측과 우측 모두 입력한 뒤, 하중 화살표가 관 중심을 향하는지 반드시 확인해야 합니다.

CIVIL NX 구조해석

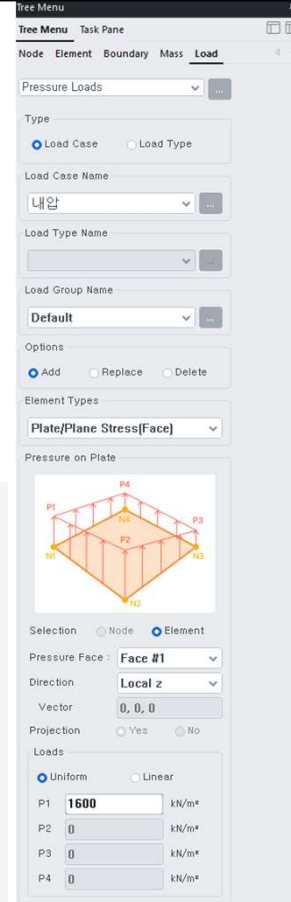
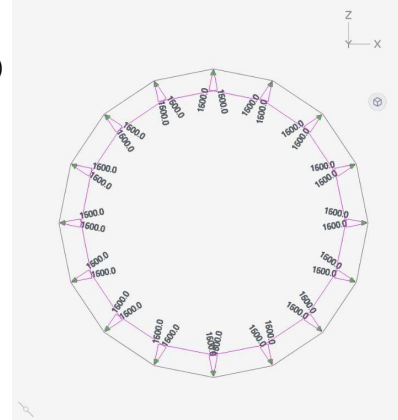
하중 화살표 방향 확인

초기 모델링 단계에서 '요소 좌표계 변환(Change Element Local Axis)'을 어떻게 설정했느냐에 따라 Local Z축의 +방향이 관의 '안쪽'일 수도 있고 '바깥쪽'일 수도 있습니다.

P1에 1600을 입력하고 Apply를 눌렀을 때, 우측 모델링 화면처럼 하중 화살표가 관의 중심에서 바깥으로 뻗어나가는 방사형(팽창하는 방향)으로 표시되는지 확인하세요. 만약 화살표가 안쪽을 향하고 있다면(수축하는 방향), 요소 좌표계 변환 을 통해 요소 좌표계를 변환하거나, 하중 값을 -1600으로 수정해서 다시 재하해야 올바른 내압 거동이 해석됩니다.

내압(Internal Pressure)

- [Load] 탭 → [Static Loads] 그룹 → [Pressure Loads]
- 설계 내압 $P_{max} = 1.6 \text{ MPa} = 1600 \text{ kN/m}^2$
- 세부 설정 및 하중 재하
 - 요소 선택: 단축키 [Ctrl] + [Shift] + [A]를 눌러 원통 모델링 전체 요소 선택
 - 세부 설정 (Pressure Loads 창):
 - Load Case Name: 내압
 - Load Group Name: Default
 - Options: (●) Add
 - Element Types: Plate/Plane Stress(Face)
 - Selection: (●) Element
 - Pressure Face: Face #1
 - Direction: Local z (요소의 수직/법선 방향)
 - 하중 값 입력:
 - Loads: (●) Uniform
 - P1: 1600 kN/m^2
 - 실행: [Apply] 클릭



이제 내압을 입력합니다.

메뉴는 Load 탭 → Static Loads 그룹 → Pressure Loads → Assign Pressure Loads입니다.

전체 Shell 요소를 선택합니다.

단축키 Ctrl + Shift + A를 사용하면 전체 요소를 선택할 수 있습니다.

Pressure Loads 창에서 Load Case Name = 내압, Element Types = Plate/Plane Stress(Face),

Selection = Element, Pressure Face = Face #1을 선택합니다.

Direction은 Local z로 설정합니다.

하중값은 Uniform으로 두고, P1에 내압값을 입력합니다.

kN-m 단위 기준으로 내압 1.6 MPa는 1600 kN/m^2 입니다.

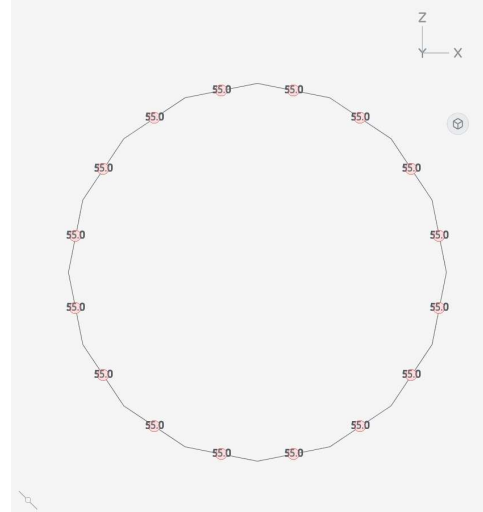
내압에서 가장 중요한 것은 하중 화살표입니다.

내압은 관 내부에서 바깥쪽으로 작용해야 하므로, 하중 화살표가 관 중심에서 외측으로 방사형으로 뻗어야 합니다.

만약 화살표가 안쪽으로 향한다면 부호를 반대로 입력하거나 요소좌표계를 다시 조정해야 합니다.

온도하중(Element Temperatures)

- [Load] 탭 → [Temperature] 그룹 → [Element Temp.] 아이콘 클릭
- 세부 설정
 - 요소 선택: 단축키 [Ctrl] + [Shift] + [A]를 눌러 원통 모델링 전체 요소 선택
 - Load Case Name: 온도
 - Load Group Name: Default
 - Options: (●) Add
 - 온도 값(Temperature) 입력
 - Initial (초기 온도): 0 [°C]
 - Final (최종 온도): 55 [°C]
 - 실행: [Apply] 클릭



온도하중은 Element Temperature 기능으로 입력합니다.

메뉴는 Load 탭 → Temperature 그룹 → Element Temp.입니다.

전체 요소를 선택하고, Load Case Name = 온도, Options = Add를 선택합니다.

온도값은 Initial = 0°C, Final = 55°C로 입력합니다.

이번 예제에서는 온도차 55도를 적용한 것입니다.

온도하중은 축방향 구속조건에 따라 결과가 크게 달라집니다.

구속이 크면 응력이 크게 나타나고, 구속이 작으면 응력보다 변위로 나타납니다.

따라서 온도하중은 결과분석에서 축방향 응력뿐 아니라 축방향 변위와 반력도 함께 확인해야 합니다.

하중 조합(Load Combination)

1. [Results] 탭 → [Combinations] 그룹 → [Load Combinations] → [General] 탭
2. STEP 1: LCB1 (내압 조건 / LOAD COMBINATION 1)
 - Load Combination List:
 - Name: LCB1 | Active: Active | Type: Add
 - Load Cases and Factors:
 - 자중(ST) | 1.0
 - 내압(ST) | 1.0
3. STEP 2: LCB2 (외압 조건 / LOAD COMBINATION 2)
 - Load Combination List:
 - Name: LCB2 | Active: Active | Type: Add
 - Load Cases and Factors :
 - 자중(ST) | 1.0
 - 매설토하중(ST) | 1.0
 - 매설토하중Side(ST) | 1.0
 - 차량하중(ST) | 1.0
 - 차량하중Side(ST) | 1.0

No	Name	Active	Type	자중(ST)	매설토하중(ST)	매설토하중SIDE(ST)	차량하중(ST)	차량하중SIDE(ST)	내압(ST)	외압(ST)
1	LCB1	Active	Add	1.0000						1.0000
2	LCB2	Active	Add	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		
3	LCB3	Active	Add	1.0000						1.0000
4	LCB4	Active	Add	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		1.0000
5	LCB5	Active	Add	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

이제 하중조합을 만듭니다.

메뉴는

Results 탭 → Combinations 그룹 → Load Combinations → General 탭입니다.

먼저 LCB1을 생성합니다.

Name = LCB1, Type = Add, Load Case에는 자중과 내압을 각각 Factor 1.0으로 추가합니다.

LCB1은 내압 조건 검토용 조합입니다.

다음으로 LCB2를 생성합니다.

Name = LCB2, Type = Add, Load Case에는 자중, 매설토하중, 매설토하중SIDE, 차량하중, 차량하중SIDE를 모두 Factor 1.0으로 추가합니다.

LCB2는 외압 조건 검토용 조합입니다.

하중 조합(Load Combination)

4. STEP 3: LCB3 (자중 + 온도 단독 조건)

- Load Combination List:
 - Name: LCB3 | Active: Active | Type: Add
- Load Cases and Factors:
 - 자중(ST) | 1.0
 - 온도(ST) | 1.0

5. STEP 4: LCB4 (전체 하중 작용 조건 - 온도 제외)

- Load Combination List:
 - Name: LCB4 | Active: Active | Type: Add
- Load Cases and Factors:
 - 자중(ST) | 1.0
 - 매설토하중(ST) | 1.0
 - 매설토하중Side(ST) | 1.0
 - 차량하중(ST) | 1.0
 - 차량하중Side(ST) | 1.0
 - 내압(ST) | 1.0

No	Name	Active	Type	자중(ST)	매설토하중(ST)	매설토하중SIDE(ST)	차량하중(ST)	차량하중SIDE(ST)	내압(ST)	온도(ST)
1	LCB1	Active	Add	1.0000						1.0000
2	LCB2	Active	Add	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		
3	LCB3	Active	Add	1.0000						1.0000
4	LCB4	Active	Add	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5	LCB5	Active	Add	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

다음으로 LCB3를 생성합니다.

LCB3는 자중 + 온도 조합입니다.

온도하중의 영향을 별도로 확인하기 위한 조합입니다.

다음은 LCB4입니다.

LCB4는 온도를 제외한 전체 하중 조건입니다.

즉, 자중, 매설토하중, 매설토하중SIDE, 차량하중, 차량하중SIDE, 내압을 모두 Factor 1.0으로 포함합니다.

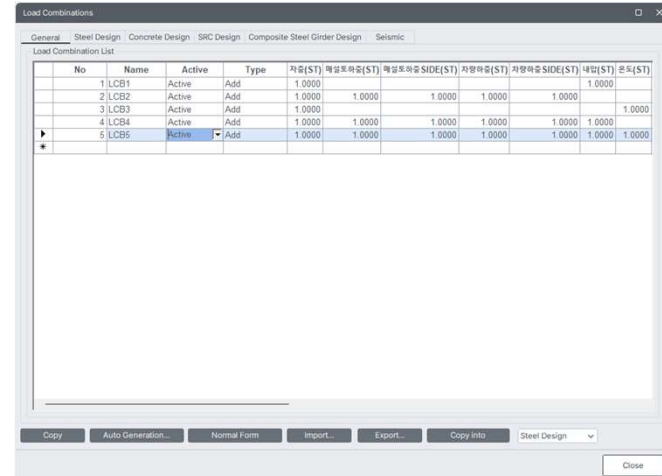
LCB4는 온도 제외 상태에서 전체 하중 작용 거동을 확인하는 용도입니다.

하중 조합(Load Combination)

6. STEP 5: LCB5 (전체 하중 작용 조건 – 온도 포함)

- Load Combination List:
 - Name: LCB5 | Active: Active | Type: Add
- Load Cases and Factors:
 - 자중(ST) | 1.0
 - 매설토하중(ST) | 1.0
 - 매설토하중Side(ST) | 1.0
 - 차량하중(ST) | 1.0
 - 차량하중Side(ST) | 1.0
 - 내압(ST) | 1.0
 - 온도(ST) | 1.0

7. 닫기: [Close] 클릭



LCB5는 온도까지 포함한 전체 하중 조건입니다.

LCB5에는 자중, 매설토하중, 매설토하중SIDE, 차량하중, 차량하중SIDE, 내압, 온도를 모두 Factor 1.0으로 추가합니다.

이 조합은 실제 복합 작용상태에서의 전체 응력과 변위를 확인하기 위한 조합입니다.

다만 계산서 안전율은 LCB5의 최대응력을 그대로 사용하는 것이 아닙니다.

안전율 산정에는 LCB1의 내압응력과 LCB2의 외압응력을 각각 추출해서 사용합니다.

LCB5는 전체 조합에서의 거동과 von Mises 등가응력을 확인하는 보조 검토용으로 이해하시면 됩니다.

CIVIL NX 구조해석

비선형 지지조건을 고려한 동시제하 하중 해석

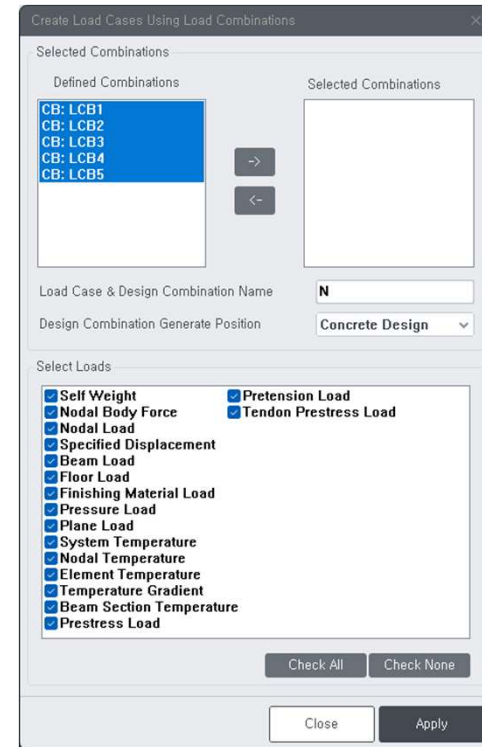
- **선형 중첩의 원리 적용 불가:** 지반 반력을 모사하는 압축 전담 스프링(Compression-only Spring)은 인장 시 저항을 상실하는 비선형적 거동을 보입니다. 따라서 개별 하중에 대한 선형 해석 결과를 단순 합산(Load Combination)하는 방식은 지반의 실제 거동을 왜곡하므로 지양해야 합니다.
- **동시제하 하중 해석:** 다양한 하중(자중, 토압, 차량, 내압, 온도)이 복합적으로 작용하는 극한 상태의 거동을 평가하기 위해서는, 전체 설계 하중을 묶어 하나의 정적 하중 케이스(Static Load Case)로 변환해야 합니다.

경계 비선형 해석을 위한 하중조합의 하중조건 치환

1. [Load] 탭 → [Create Load Cases] → [Using Load Combinations] 클릭
2. 세부 설정
 - 조합 선택: 좌측(Defined) 목록에서 변환할 하중 조합(LCB1~LCB5) 선택
 - 우측 이동: 중앙의 [->] 화살표를 눌러 우측(Selected) 목록으로 이동
 - 이름 지정: 식별자(Prefix) 칸에 N 입력 (*생성 시 NLCB1 형태로 저장됨*)
 - 성분 포함: 하단 구성 요소 체크 확인
3. 적용: [Apply] 클릭

해석 수행

1. Perform Analysis (F5) 를 클릭



마지막으로 하중조합을 정적 하중케이스로 변환합니다.

이 단계가 필요한 이유는 압축전용 지반스프링 때문입니다.

압축전용 스프링은 인장 시 저항을 하지 않는 비선형 조건입니다.

따라서 개별 하중의 선형해석 결과를 단순히 조합하는 방식은 실제 지반거동과 차이가 날 수 있습니다.

메뉴는 Load 탭 → Create Load Cases → Using Load Combinations입니다.

왼쪽 Defined 목록에서 LCB1부터 LCB5까지 선택하고, 가운데 화살표를 눌러 오른쪽 Selected 목록으로 이동하고 Apply를 클릭합니다.

그러면 LCB1은 NLCB1, LCB2는 NLCB2처럼 새로운 정적 하중케이스로 생성됩니다.

이제 해석을 수행하겠습니다. 해석 수행

Civil NX

결과분석

Result Verification

Civil NX에서 내압응력과 외압응력을 추출하고, 계산서 산정식과 비교하여 결과를 검토한다

이제 해석 결과를 확인하겠습니다. 결과 분석에서 가장 중요한 것은, 현재 모델의 목적에 맞춰 어떤 응력 성분을 볼 것인지를 정확히 판단하는 것입니다.

응력 성분(Components)

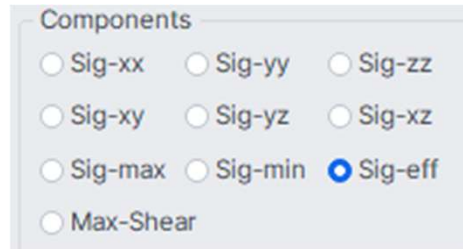
해석 목적과 예상되는 파괴 모드(Failure Mode)에 맞춰 적절한 응력 성분을 선택하여 검토

1. 수직 응력 (Normal Stress) : 인장(Tension) 및 압축(Compression) 거동

- **Sig-xx & Sig-yy**: 부재 단면의 법선 방향으로 작용하는 직응력(Direct Stress). 강관 해석 시 Sig-xx는 축 방향 인장/압축, Sig-yy는 원주 방향(Hoop) 팽창/수축에 의한 변형 거동을 직관적으로 평가할 때 주로 사용.
- **Sig-zz**: 셸(Shell)의 두께 방향으로 작용하는 수직 응력. (박판 및 얇은 강관 해석에서는 평면 응력 상태로 가정하여 통상적으로 무시.)

2. 전단 응력 (Shear Stress) : 미끄러짐(Sliding) 및 각변형(Angular Deformation)

- **Sig-xy (면내 전단)**: 부재 단면의 접선 방향으로 작용하는 엇갈림 응력. 재료 내부의 전단 미끄러짐을 유발하여 요소의 형태적 각변형(Distortion)이 발생하는 취약부를 검토할 때 확인.
- **Sig-yz & Sig-xz (면외 전단)**: 셸의 두께 방향(Out-of-plane)으로 작용하는 전단 응력. 국부적인 하중 집중으로 인해 판재가 뚫리는 펀칭 전단(Punching Shear) 저항성을 검토할 때 활용.



© MIDAS IT Co., Ltd

결과창에 나오는 기호들을 먼저 간략히 정리해 드리겠습니다.

- Sig-xx와 Sig-yy는 시그마 xx, 시그마 yy의 약자이며, Normal Stress 즉 '수직 응력'입니다. 부재 단면의 법선 방향으로 작용하는 응력이며, 작용 방향에 따라 해당 부재에 축방향의 인장 또는 압축 변형을 유발합니다.
- Sig-xy는 시그마 xy의 약자이며, Shear Stress 즉 '전단 응력'입니다. 부재 단면의 접선 방향으로 작용하는 응력이며, 재료 내부의 미끄러짐을 유발하여 요소의 각변형 및 형태적 일그러짐을 발생시킵니다.

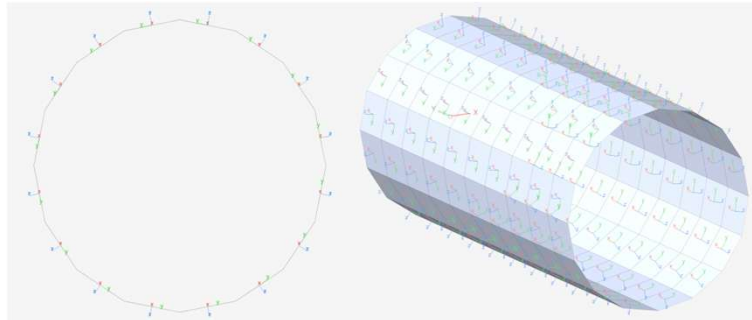
응력 성분(Components)

3. 주응력 (Principal Stress) : 최대/최소 주응력 상태

- **Sig-max (최대 주응력)**: 다축 응력 상태를 모어의 원(Mohr's Circle)으로 해석했을 때 발생하는 가장 큰 인장 응력. 콘크리트나 암석과 같이 취성(Brittle) 파괴를 일으키는 재료의 인장 균열 발생 여부를 판정할 때 지배적으로 사용.
- **Sig-min (최소 주응력)**: 수치상 가장 큰 음수(-) 값을 가지는 가장 큰 압축 응력. 재료의 국부적인 압축 파괴나 좌굴(Buckling) 저항성을 검토할 때 기준.

4. 종합 파손 지표 (Failure Criteria) : 연성/취성재의 항복 및 파괴 판정

- **Sig-eff (유효 응력, von-Mises Stress)**: 다축 상태의 복합 응력을 수학적 파손 이론에 따라 '등가의 1축 응력(Equivalent Stress)'으로 환산한 스칼라 값. 강재와 같은 연성 재료(Ductile Material)가 최종적으로 항복점(Yield Point)에 도달했는지 판정하는 가장 대표적이고 핵심적인 안전성 평가 지표.
- **Max-Shear (최대 전단 응력, Tresca Stress)**: 요소 내에서 발생할 수 있는 최대 전단 응력 값. 금속 부재의 비틀림이나 전단 파손을 폰-미세스(von-Mises)보다 더욱 보수적으로 평가하고자 할 때 설계 지표로 활용.



© MIDAS IT Co., Ltd

- Sig-EFF는 시그마 이펙티브(Effective)의 약자이며, von-Mises Stress 즉 '유효 응력'입니다. 다축 응력 상태의 복합적인 응력 성분들을 수학적으로 조합하여, 등가의 1축 응력으로 환산한 값입니다. 주로 연성재료의 항복 여부를 판정하는 파손 이론의 대표적인 평가 지표로 활용됩니다.

이러한 기준을 바탕으로 이번 모델을 살펴보겠습니다.

이번 모델에서는 요소의 local y축이 원주방향으로 설정되어 있습니다.

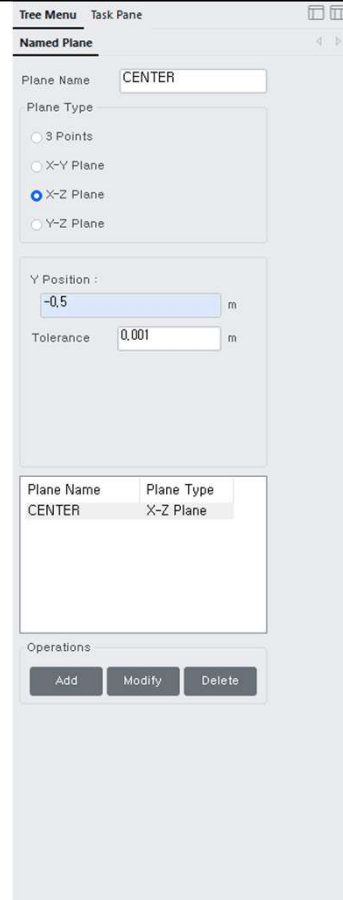
따라서 파이프에 작용하는 내압과 외압의 영향은 Sig-yy를 중심으로 확인합니다.

반면, 온도 하중에 의한 온도응력은 부재의 길이 방향으로 작용하는 축방향 응력이므로 Sig-xx도 함께 확인합니다.

마지막으로 각 방향의 응력을 개별적으로 확인하신 후에는, 종합 지표인 Sig-EFF(유효 응력)를 확인하여 이 구조물이 최종적으로 안전한지 평가해 주시면 됩니다.

Named Plane 설정

1. [View] 탭 → [View] 그룹 → [Named] → [Named Plane] 클릭
2. 평면 정의
 - Plane Name: 생성할 평면의 이름을 입력 (예: CENTER)
 - Plane Type: 단면의 방향을 선택합니다.
 - (●) X-Z Plane: 관의 축 방향(Y축)에 수직인 횡단면을 볼 때 선택
 - Position 설정:
 - Y Position: 결과를 확인하고자 하는 위치의 좌표를 입력 (예: -0.5 m)
 - Tolerance: 평면에 포함될 노드/요소의 오차 범위를 지정 (기본값 0.001 m)
3. 추가: [Add] 클릭



결과를 전체 모델에서만 보면 응력 분포를 직관적으로 보기 어렵습니다.

그래서 먼저 Named Plane을 설정해서, 특정 횡단면에서 응력 분포를 확인할 수 있도록 하겠습니다.

여기서는 CENTER라는 이름으로 단면을 생성합니다.

Plane Type은 X-Z Plane을 선택합니다. 이 평면은 관의 축방향, 즉 Y축에 수직인 단면입니다.

Y Position은 결과를 확인하고 싶은 위치를 입력합니다.

예제에서는 모델 중앙부 근처인 -0.5 m 위치를 사용합니다.

이렇게 Named Plane을 만들어 두면, 뒤에서 Cutting Diagram을 이용해 단면상의 응력 분포를 확인할 수 있습니다.

결과분석에서는 단순히 최대값만 보는 것보다, 이 단면에서 응력이 어떤 방향과 위치에서 발생하는지를 같이 보는 것이 중요합니다.

CIVIL NX 결과분석

Civil NX 해석결과 추출 및 안전성 검토

계산서 항목	의미	Civil NX에서 뽑아야 하는 값
f_1	내압응력	내압 조합에서의 관벽 응력
f_2	외압응력	외압 조합에서의 관벽 응력
$f_1 + f_2$	작용응력 합	내압응력과 외압응력의 합
f_a	인장강도	재료 물성값
$S.F$	안전율	$f_a / (f_1 + f_2)$
좌굴 안정성	외압좌굴 검토	수계산 q_a 와 작용외압 W 비교, 필요 시 좌굴해석

평가등급	감소계수	평가기준	비고
a	1.0	$2.5 \leq S.F$	여기서, 안전율은 집단에너지시설의 기술기준 제17조, 제 29조에 따라 계산한다. 안전율(S.F) = 재료의 인장강도 / (f1+f2) (f1 : 내압응력, f2 : 외압응력)
b	0.9	$2.0 \leq S.F < 2.5$	
c	0.8	$1.0 \leq S.F < 2.0$	
d	0.7	$S.F < 1.0$	

이 슬라이드는 해석결과를 계산서 형식으로 정리할 때 필요한 값을 정리한 것입니다.

계산서에서 필요한 핵심 값은 세 가지입니다.

첫 번째는 내압응력 f_1 입니다.

이 값은 내압 조합인 NLCB1에서 관벽의 원주방향 응력을 추출해서 사용합니다.

두 번째는 외압응력 f_2 입니다.

이 값은 외압 조합인 NLCB2에서 관벽의 원주방향 응력을 추출해서 사용합니다.

세 번째는 재료의 인장강도 f_a 입니다.

이 값은 Civil NX 해석결과에서 나오는 값이 아니라, 재료 물성 또는 재료규격에서 확인하는 값입니다.

안전율은 다음 식으로 계산합니다.

$$S.F = \frac{f_a}{f_1 + f_2}$$

또 하나 중요한 점은 좌굴 안정성입니다.

외압 좌굴은 응력값과 직접 비교하지 않습니다.

좌굴은 작용외압 W 와 허용좌굴하중 q_a 를 비교해서 판단합니다.

좌굴에 대한 상세 검토는 추가적인 좌굴 해석을 통해서 상세히 확인 할 수 있습니다.

CIVIL NX 결과분석

Type of Display (시각화 옵션)

- Contour (등고선 지도): 모델 표면에 결과값을 색상으로 입혀 표시 (전체적인 취약부 위치 스캔용)
- Deform (변형 형상): 하중에 의해 찌그러지거나 처진 구조물의 최종 형상을 중첩하여 표시 (역학적 거동 오류 검증용)
- Values (수치 표시): 모델의 절점/요소 위치에 결과 수치를 텍스트로 직접 표시 (특정 포인트의 정확한 데이터 캡처용)
- Legend (수치 범례): 화면 측면에 색상별 수치 범위를 나타내는 막대를 표시 (Contour 색상의 기준값 파악을 위한 필수 옵션)
- Cutting Diagram (단면 다이어그램): 지정한 횡단면을 따라 결과값의 크기를 선 그래프로 표시(단면 내 급격한 응력 변화율(Gradient) 정밀 검토용)
- Animate (애니메이션): 하중 증가에 따른 변형 및 응력 전파 과정을 동영상으로 재생

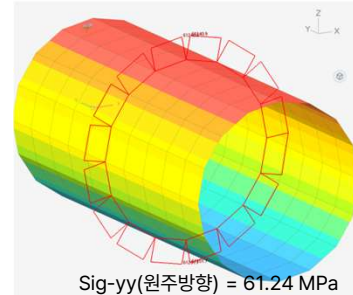
내압 조건(NLCB1) 원주 방향 응력 검토

1. [Results] 탭 → [Result Display] → [Stresses] → [Plane-Stress/Plate Stresses]
2. 해석 결과 출력 설정
3. Load Cases/Combinations: CBS: NLCB1 (자중+내압)
4. Stress Options (응력 산출 기준):
 - 좌표계: (●) Local (개별 요소 자체 좌표계 기준)
 - 데이터 위치: (●) Avg. Nodal (절점 평균 응력)
 - 출력 위치: (●) Top (헬 상부면)
5. Components (응력 성분):
 - (●) Sig-yy (Hoop Stress)
6. Type of Display (시각화 옵션):
 - Contour: 활성화 (응력 분포 색상 표시)
 - Legend: 활성화 (수치 범례 표시)
 - Cutting Diagram: 활성화 → [...] 검토 단면(CENTER) 지정

$$\sigma_p = \frac{PD}{2t}$$

내압 $P = 1.6MPa$, 내경 $D = 495.2mm$, 두께 $t = 6.4mm$ 를 적용하면,

$$\sigma_p \approx 61.90MPa$$



이제 내압 조건의 결과를 확인하겠습니다.

결과 메뉴에서 Plane-Stress Plate Stresses를 선택하고, Load Case는 NLCB1을 선택합니다.

NLCB1은 자중과 내압이 함께 작용하는 조건입니다.

Stress Options에서는 반드시 Local을 선택합니다.

전역 좌표계 기준으로 보면 관의 원주방향 응력을 정확하게 확인하기 어렵기 때문입니다.

이번 모델에서는 local y 방향이 원주방향이므로, Components에서는 Sig-yy를 선택합니다.

결과를 보면 NLCB1에서 원주방향 응력 Sig-yy가 61.24 MPa로 확인됩니다.

이 값을 수계산 내압응력과 비교해 보겠습니다.

내압응력은 다음 식으로 계산합니다.

$$\sigma_p = \frac{PD}{2t}$$

500 조건에서 내압 $P = 1.6MPa$, 내경 $D = 495.2mm$, 두께 $t = 6.4mm$ 를 적용하면, $\sigma_p = 61.24MPa$ 입니다.

Civil NX 결과는 61.90 MPa이므로 수계산값과 매우 잘 일치합니다.

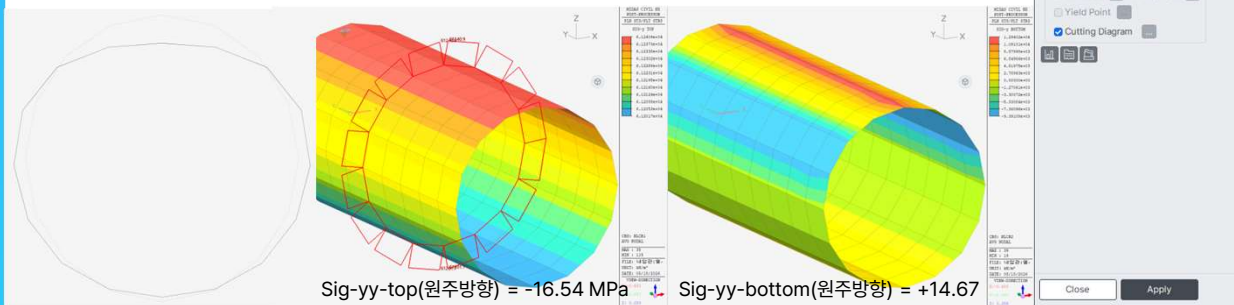
따라서 내압 입력값, 관 두께, 관경, 요소 좌표계가 적정하게 반영된 것으로 판단할 수 있습니다.

내압 결과가 이론값과 크게 다르면 우선 세 가지를 확인해야 합니다.

첫째, 내압 단위가 맞는지, 둘째, Shell 두께가 맞는지, 셋째, 원주방향 응력 성분을 제대로 보고 있는지입니다.

외압 조건(NLCB2) 원주 방향 응력 검토

1. [Results] 탭 → [Result Display] → [Stresses] → [Plane-Stress/Plate Stresses]
2. 해석 결과 출력 설정
3. Load Cases/Combinations: CBS: NLCB2 (자중+매설토+차량하중)
4. Stress Options (응력 산출 기준):
 - 좌표계: (●) Local (개별 요소 자체 좌표계 기준)
 - 데이터 위치: (●) Avg. Nodal (절점 평균 응력)
 - 출력 위치: (●) Top (셸 상부면), and (●) Bottom (셸 하부면)
5. Components (응력 성분):
 - (●) Sig-yy (Hoop Stress)
6. Type of Display (시각화 옵션):
 - Contour: 활성화 (응력 분포 색상 표시)
 - Legend: 활성화 (수치 범례 표시)
 - Cutting Diagram: 활성화 → [...] 검토 단면(CENTER) 지정



다음은 외압 조건입니다.

외압 조건은 NLCB2를 선택합니다.

NLCB2에는 자중, 매설토하중, 측면 매설토하중, 차량하중, 측면 차량하중이 포함되어 있습니다.

내압 검토와 마찬가지로 좌표계는 Local을 선택하고, 원주방향 응력인 Sig-yy를 확인합니다.

다만 외압은 내압과 달리 관벽에 힘을 유발합니다.

따라서 Top과 Bottom 응력을 모두 확인해야 합니다.

결과를 보면, $Sig-yy_{Top} = -16.54MPa$, $Sig-yy_{Bottom} = +14.67MPa$ 입니다.

Top과 Bottom의 부호가 반대로 나타나는 것은 외압에 의해 관벽 힘이 발생하고 있다는 의미로 볼 수 있습니다.

외압 힘응력 성분은 Top과 Bottom 차이의 절반으로 계산합니다.

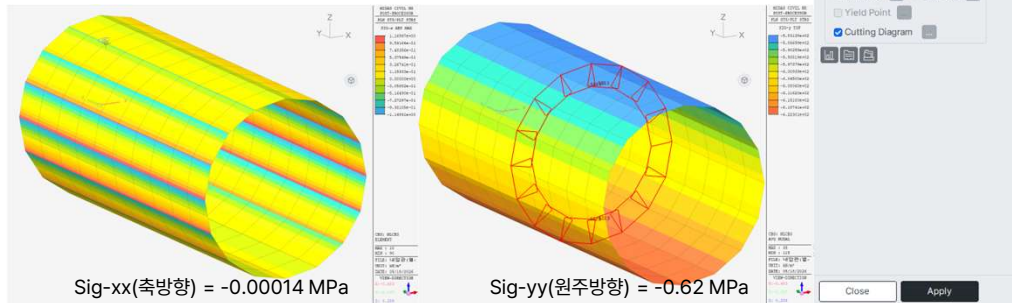
$$\sigma_b = \left| \frac{\sigma_{Top} - \sigma_{Bottom}}{2} \right|, \text{ 값을 대입하면, } \sigma_b = \left| \frac{-16.54 - 14.67}{2} \right| = 15.607 \text{ MPa 입니다.}$$

다만 안전율 계산에서는 보수적으로 최대 표면응력 절대값을 사용할 수 있습니다.

Top과 Bottom 중 절대값이 큰 값은 16.54 MPa이므로, $f_2 = 16.54 \text{ MPa}$ 로 적용합니다.

온도(NLCB3) 축 방향, 원주 방향 응력 검토

1. [Results] 탭 → [Result Display] → [Stresses] → [Plane-Stress/Plate Stresses]
2. 해석 결과 출력 설정
3. Load Cases/Combinations: CBS: NLCB3 (자중+온도)
4. Stress Options (응력 산출 기준):
 - 좌표계: (●) Local (개별 요소 자체 좌표계 기준)
 - 데이터 위치: (●) Avg. Nodal (절점 평균 응력)
 - 출력 위치: (●) Top (셸 상부면)
5. Components (응력 성분):
 - (●) Sig-yy (Hoop Stress), (●) Sig-xx (Axial Stress)
6. Type of Display (시각화 옵션):
 - Contour: 활성화 (응력 분포 색상 표시)
 - Legend: 활성화 (수치 범례 표시)
 - Cutting Diagram: 활성화 → [...] 검토 단면(CENTER) 지정



이번 슬라이드는 온도하중 조합인 NLCB3 결과입니다.

NLCB3는 자중과 온도하중이 함께 작용하는 조합입니다.

온도하중은 앞에서 설명드린 것처럼, 관이 길이방향으로 팽창하려는 것을 구속할 때 축방향 응력으로 나타납니다.

따라서 온도응력 검토에서는 원주방향 응력인 Sig-yy뿐 아니라, 축방향 응력인 Sig-xx를 함께 확인해야 합니다.

이번 결과를 보면, $Sig-yy = -0.62MPa$ $Sig-xx = -0.00014MPa$ 입니다.

두 응력 모두 매우 작게 나타났고, 특히 축방향 응력은 거의 0에 가깝습니다.

이 값이 작게 나온 것은 오류가 아니라, 현재 예제 모델에서 축방향 구속조건이 거의 없기 때문입니다.

온도하중은 관을 팽창시키려고 하는데, 축방향으로 자유롭게 팽창할 수 있으면 응력은 크게 발생하지 않습니다.

반대로 앵커나 고정단처럼 축방향 변위가 구속되어 있으면, 완전구속 온도응력식인 $\sigma_t = E\alpha\Delta T$ 에 가까

운 큰 응력이 발생할 수 있습니다.

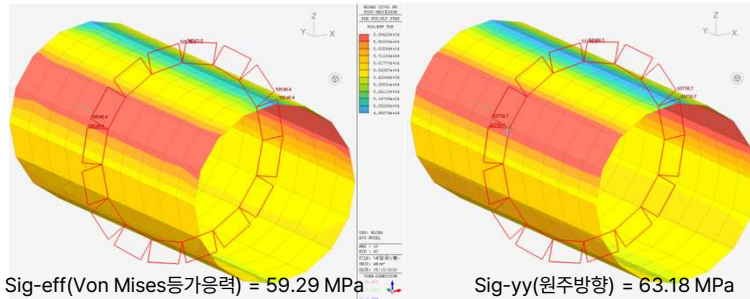
현재 모델에서는 축방향 구속이 거의 없으므로 온도하중이 응력보다는 변위로 나타나는 조건입니다.

실제 열수송관 검토에서는 앵커, 가이드, 신축이음, 토사마찰 조건이 온도응력에 큰 영향을 줍니다.

따라서 온도하중을 검토할 때는 Sig-xx 축방향 응력뿐 아니라, 축방향 변위와 지점 반력, 앵커반력도 함께 확인해야 합니다.

전체 하중 조건(NLCB5) 원주 방향 및 등가 응력(Von Mises) 검토

1. [Results] 탭 → [Result Display] → [Stresses] → [Plane-Stress/Plate Stresses]
2. 해석 결과 출력 설정
3. Load Cases/Combinations: CBS: NLCB5 (자중+외압+내압+온도)
4. Stress Options (응력 산출 기준):
 - 좌표계: (●) Local (개별 요소 자체 좌표계 기준)
 - 데이터 위치: (●) Avg. Nodal (절점 평균 응력)
 - 출력 위치: (●) Top (셸 상부면)
5. Components (응력 성분):
 - (●) Sig-yy (Hoop Stress), (●) Sig-eff (Von mises 등가 응력)
6. Type of Display (시각화 옵션):
 - Contour: 활성화 (응력 분포 색상 표시)
 - Legend: 활성화 (수치 범례 표시)
 - Cutting Diagram: 활성화 → [...] 검토 단면(CENTER) 지정 59.29MPa < 245MPa (SS400 항복응력)



이번에는 온도까지 포함한 전체 하중 조건인 NLCB5 결과입니다.

NLCB5에는 자중, 외압, 내압, 온도하중이 모두 포함되어 있습니다.

이 조합은 실제 복합 작용상태에서 구조물이 어떤 응력 상태를 보이는지 확인하기 위한 용도입니다.

여기서는 두 가지 값을 확인합니다.

첫 번째는 원주방향 응력인 Sig-yy입니다.

$Sig-yy = 63.18MPa$ 입니다.

두 번째는 von Mises 등가응력인 Sig-eff입니다.

$Sig-eff = 59.29MPa$ 입니다.

Sig-eff는 여러 방향의 응력 상태를 하나의 등가응력으로 환산한 값입니다.

따라서 전체 하중 조합에서 강재가 항복 수준에 도달하는지 참고 검토하는 데 사용할 수 있습니다.

이번 예제에서 SS400의 항복강도를 245 MPa로 보면, $59.29MPa < 245MPa$
이므로 항복에 대해서는 충분한 여유가 있는 것으로 판단할 수 있습니다.

다만 여기서 중요한 점이 있습니다.

Sig-eff는 전체 조합의 항복 여부를 확인하는 참고값입니다.

계산서 안전율 산정에 직접 사용하는 값은 아닙니다.

계산서 안전율은 앞에서 구한 내압응력 f_1 과 외압응력 f_2 를 별도로 적용해서 계산합니다.

따라서 이 슬라이드의 Sig-eff는 전체 조합의 등가응력 검토용, 다음 슬라이드의 f_1 , f_2 는 계산서 안전율 산정용으로 구분해서 이해하시면 됩니다.

CIVIL NX 결과분석

안전율 S.F계산

안전율은 다음 식으로 계산합니다.

$$S.F = \frac{f_a}{f_1 + f_2}$$

$$f_a = 400MPa$$

$$f_1 = 61.24MPa$$

$$f_2 = 16.54MPa$$

$$S.F = \frac{400}{61.24 + 16.54}$$

$$S.F = \frac{400}{77.78}$$

$$S.F = 5.143$$

$$\sigma_b = \left| \frac{-16.54 - 14.67}{2} \right| = 15.607MPa$$

평가등급

$$S.F(5.143) \geq 2.5$$

따라서 평가등급은 a등급 입니다.

평가등급	평가기준
a	$2.5 \leq S.F$
b	$2.0 \leq S.F < 2.5$
c	$1.0 \leq S.F < 2.0$
d	$S.F < 1.0$

항목	값
내압응력 (f_1)	61.24 MPa
외압응력 (f_2)	16.54 MPa
외압 휨응력 성분 (σ_b)	15.607 MPa
작용응력 합 ($f_1 + f_2$)	77.78 MPa
인장강도 (f_a)	400 MPa
안전율 (S.F)	5.143
평가등급	a

마지막으로 안전율을 계산합니다.

안전율 식은 다음과 같습니다.

$$S.F = \frac{f_a}{f_1 + f_2}$$

여기서 f_a 는 재료의 인장강도입니다.

이번 예제에서는 SS400의 인장강도 400 MPa를 적용합니다.

내압응력 f_1 은 NLCB1에서 확인한 원주방향 응력입니다.

$$f_1 = 61.24MPa$$

외압응력 f_2 는 NLCB2에서 확인한 Top과 Bottom 응력 중 최대 표면응력 절대값을 적용합니다.

$$f_2 = 16.54MPa$$

안전율 계산에는 보수적으로 $f_2 = 16.54MPa$ 를 적용합니다.

따라서 작용응력 합은, $f_1 + f_2 = 61.24 + 16.54 = 77.78MPa$ 입니다.

인장강도 $f_a = 400MPa$ 를 적용하면, $S.F = \frac{400}{77.78} = 5.143$ 입니다.

평가기준상 $S.F \geq 2.5$ 이면 a등급이므로, 본 예제의 평가등급은 a등급입니다.

여기서 다시 한 번 정리하면,

내압응력은 NLCB1에서, 외압응력은 NLCB2에서 각각 추출했고, 전체 조합의 von Mises 응력은 별도의 참고 검토값으로 사용했습니다.

Thank You!

오늘은 Civil NX를 활용해서 열수송관을 Shell 모델로 구성하고, 지반스프링, 토압, 차량하중, 내압, 온도 하중을 적용한 뒤, 결과를 계산서 형식으로 정리하는 과정을 살펴봤습니다.

핵심은 세 가지입니다.

첫 번째는 단위와 하중 방향입니다.

특히 내압은 관 중심에서 바깥쪽으로 작용해야 하고, 압력 단위가 맞지 않으면 결과가 크게 달라집니다.

두 번째는 요소 좌표계입니다.

이번 모델에서는 local y가 원주방향이므로 내압과 외압은 Sig-yy를 기준으로 확인했습니다.

세 번째는 결과 성분의 의미입니다.

내압은 원주방향 응력, 외압은 원주방향의 Top/Bottom 응력 및 힘응력 성분, 온도는 축방향 응력과 변위, 전체 조합은 von Mises 등가응력을 확인했습니다.

즉, 해석 결과를 단순히 최대값 하나로 판단하는 것이 아니라, 계산식의 의미에 맞는 응력 성분을 선택해서 비교하는 것이 중요합니다.

이상으로 Civil NX를 활용한 내압관, 열수송관 모델링 및 결과검토 강의를 마치겠습니다.

감사합니다.