

CIVIL NX | 내압관 모델링(열수송관편)

임정현 | 구조사업팀 프로

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

01. 내압관 개요

Pressure Pipeline Overview

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

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

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

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

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

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.

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	힘응력 (σ_b)	토압 + 차량하중에 의한 관벽 힘응력
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

열수송관 기본 이론

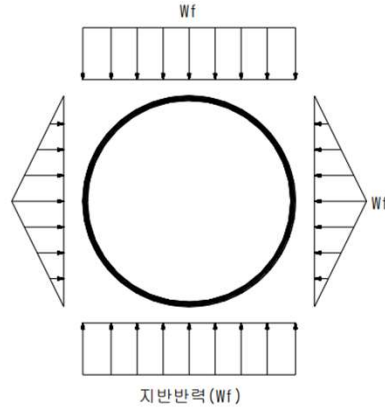
계산에 필요한 입력자료

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

열수송관 기본 이론

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	$B = 2D + 100$

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

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

$$\mu' = \tan 30^\circ = \mathbf{0.577}$$

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

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

$$C_d \approx \mathbf{0.73}$$

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

$$W_v \approx \mathbf{0.318kgf/cm^2}$$

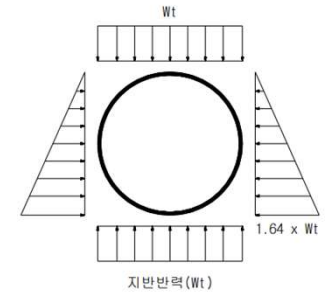
단위 변환:

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

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

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

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

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

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

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

$$W_t \approx \mathbf{0.100kgf/cm^2}$$

단위 변환:

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

외압에 의한 휨응력 산정식

매설관의 휨응력 산정식(Spangler's Bending Stress Formula)

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

기호	의미	비고
σ_b	외압에 의한 발생 휨응력	kgf/cm^2 또는 MPa 변환
f	형상계수	예시: 1.5
z	단위폭당 단면계수	
W_b	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

열수송관 기본 이론

외압 힘응력 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

외압 힘응력 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:

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

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

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

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

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

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:

$$P = 1.6MPa$$

$$D = 495.2mm$$

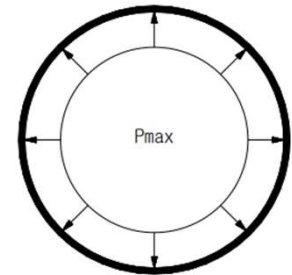
$$t = 6.4mm$$

계산

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

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

$$\sigma_p = 61.90MPa$$



열수송관 기본 이론

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

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

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:

$$E = 210,000MPa$$

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

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

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

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

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.

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

CIVIL NX

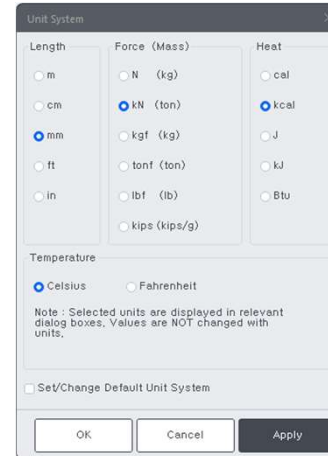
구조해석

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

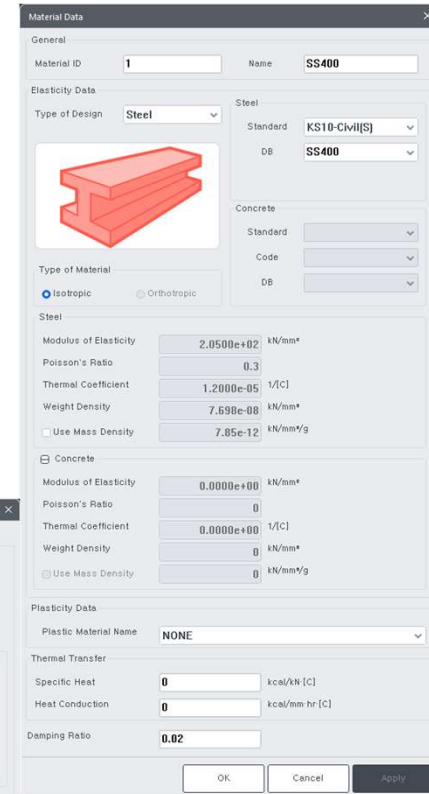
단위 설정

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



CIVIL NX 구조해석

중형비(Aspect 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): $1000 / 10 = 100 \text{ mm}$

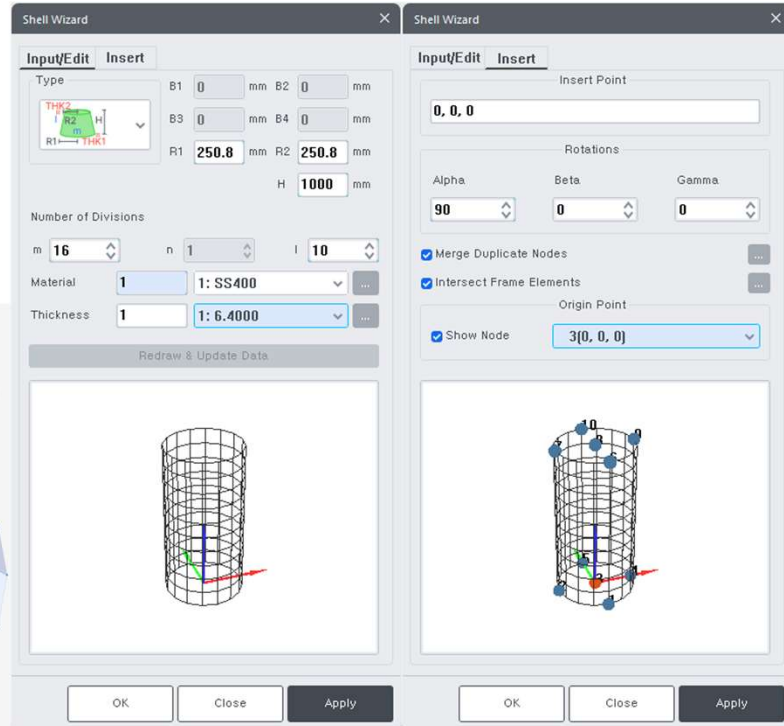
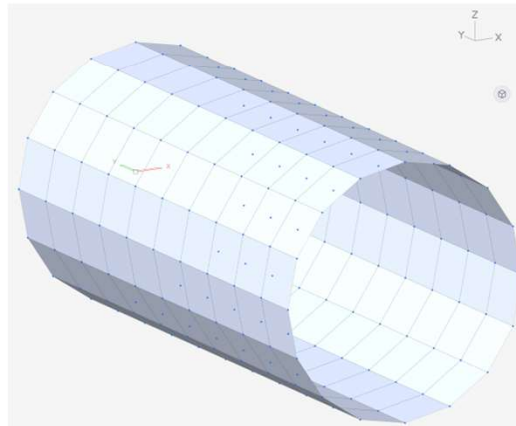
- 원주 방향 (가로): $(2 \times \pi \times 250.8) / 16 \approx 98.49 \text{ mm}$

*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 절점): Show Node 옵션 체크, 3(0, 0, 0)
- 실행[OK] 클릭



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

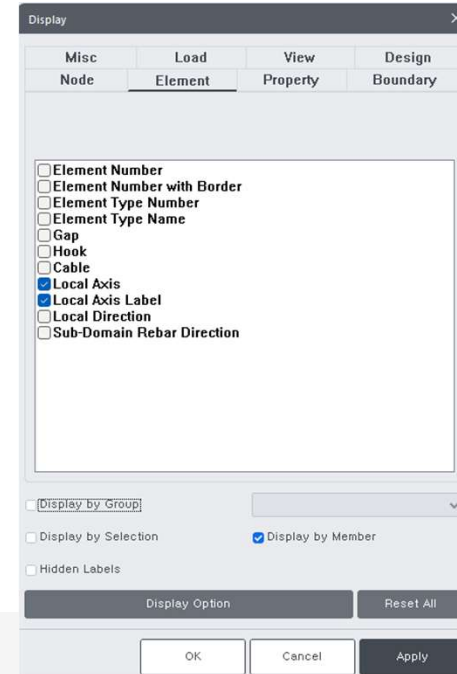
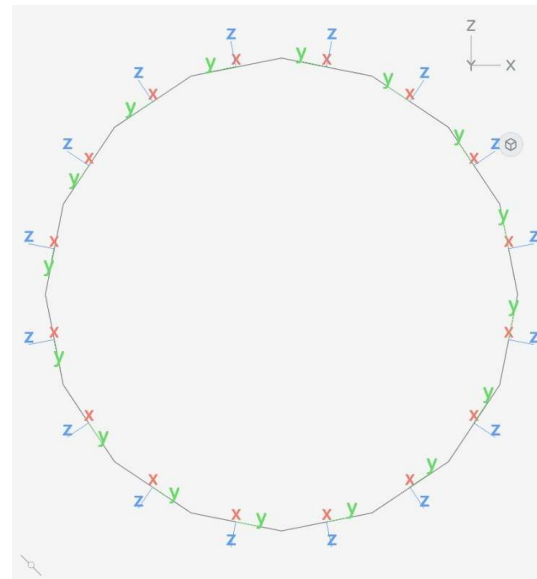
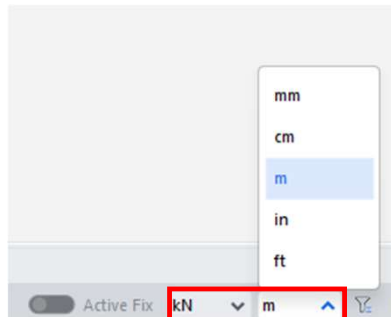
ISO View = ctrl + shift + I

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

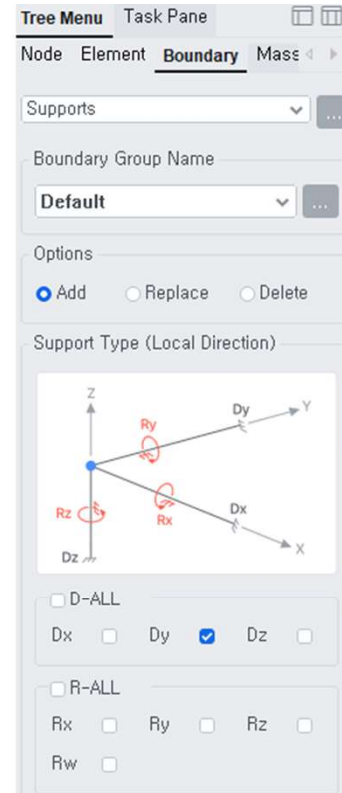
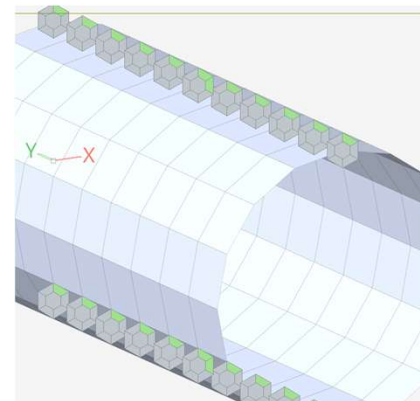
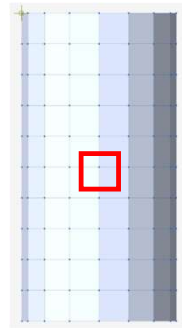
단위 변환

1. mm → m



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



요소 창 선택 Hot Key

Select by Window = ctrl + shift + C

경계조건 설정 (Surface Spring)

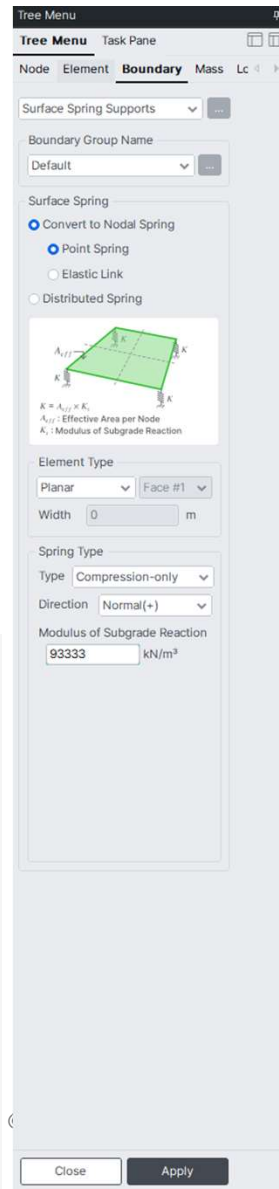
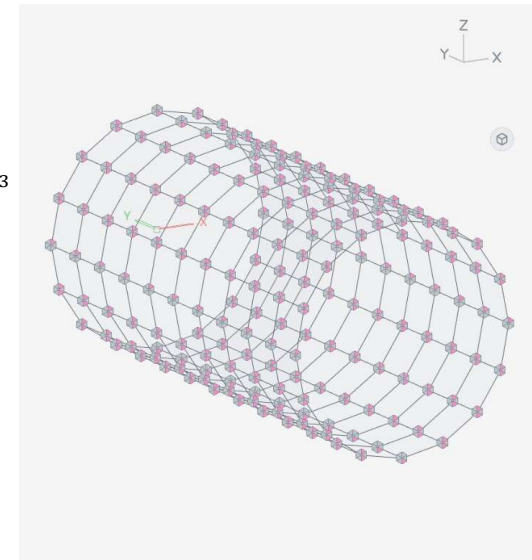
1. 요소 선택

- [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



CIVIL NX

구조해석

Static Load Cases에서 TYPE 찾기 요령

키보드 영문 전환

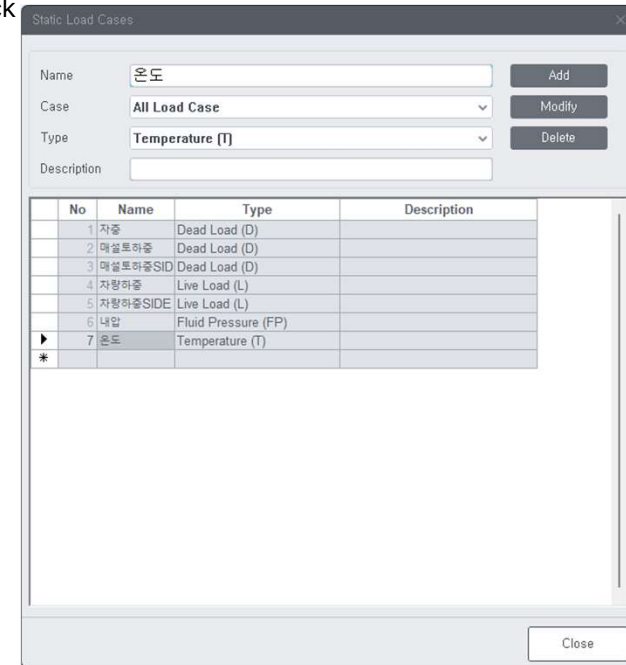
Ex) Temperature

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



CIVIL NX

구조해석

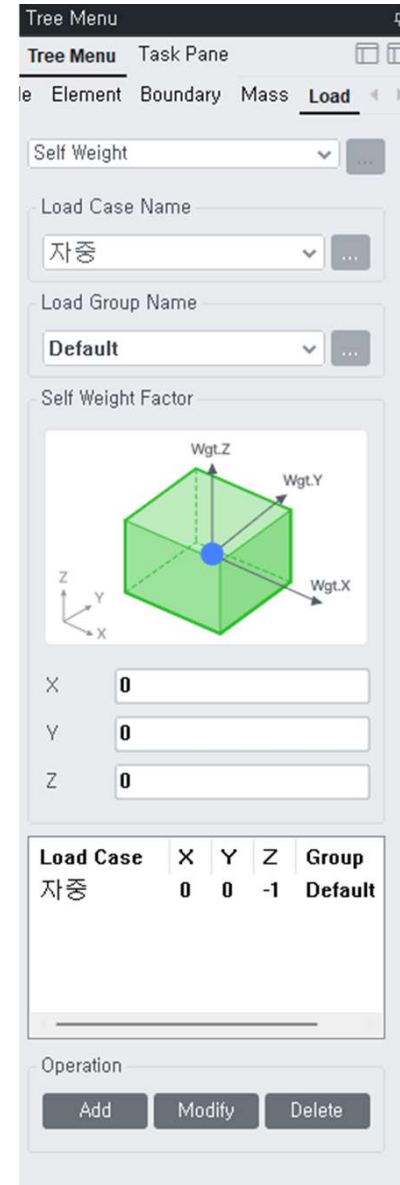
열수송관(이중보온관) 자중 적용 시 주의사항

현재 모델링된 Shell 요소는 '강관(SS400)' 재질만 입력된 상태입니다. 따라서 프로그램에서 Z = -1을 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

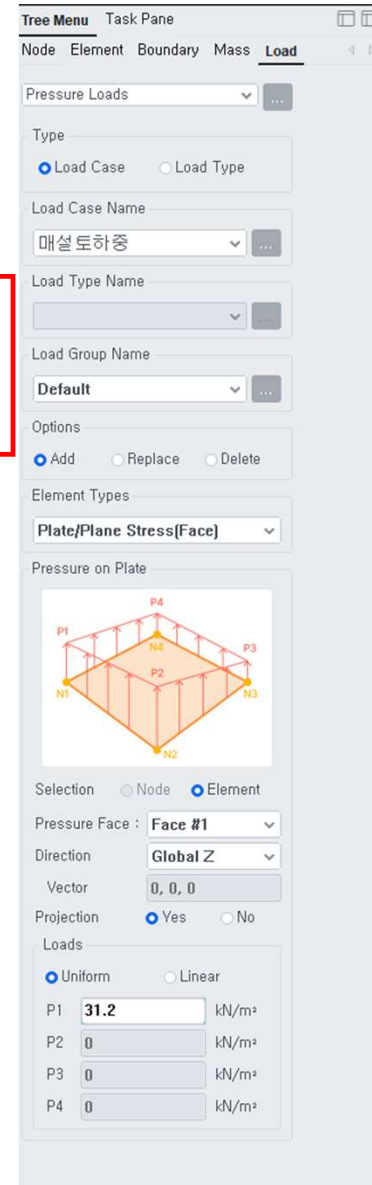


매설토 하중 (수직 토압 및 반력)-상단

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

2. STEP 1: 상단 매설토 하중 (수직 토압) 재하

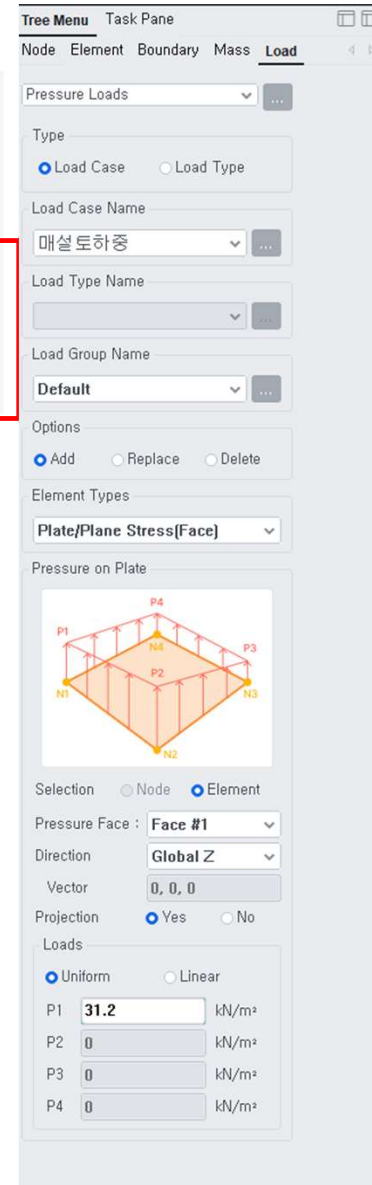
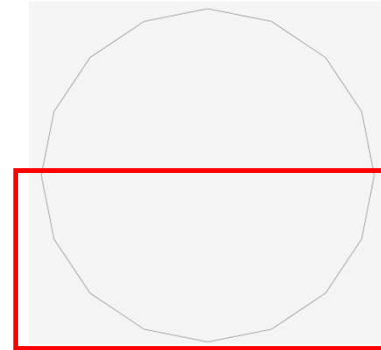
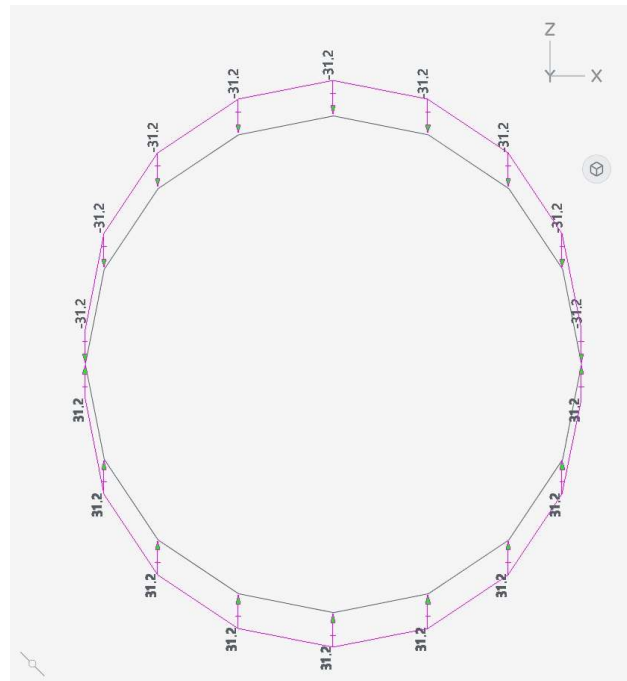
- 요소 선택: 원통의 상단 절반(Top Half)구역 요소 선택
- 세부 설정 (Pressure Loads 창):
 - Load Case Name: 매설토하중
 - Load Group Name: Default
 - Options: (●) Add
 - Element Types: Plate/Plane Stress(Face)
 - Selection: (●) Element
 - Pressure Face: Face #1
 - Direction: Global Z (전체 좌표계 Z축 방향)
 - Projection: (●) Yes (원형 면적에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



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



CIVIL NX 구조해석

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)

상단 좌측 구역 증감률 계산

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

$$31.2 = g \times 0.2508$$

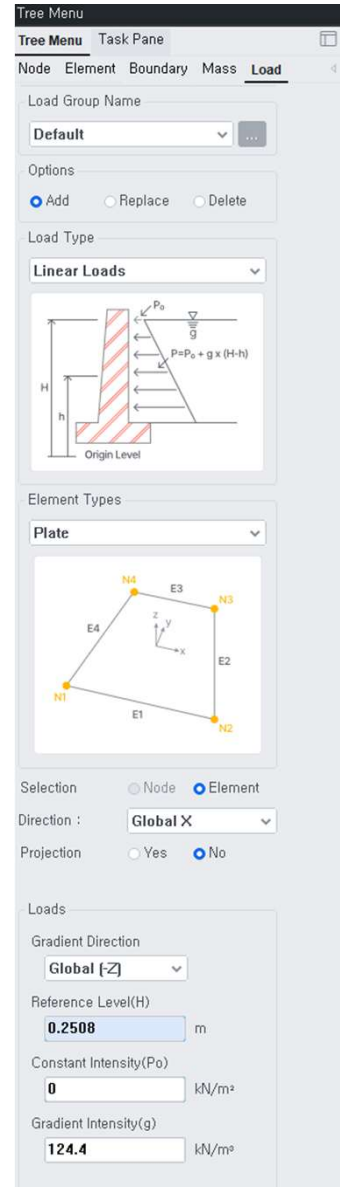
$$g = 124.40$$

H (Reference Level) 입력 방법

Z 좌표 수치를 직접 입력하거나, 입력란을 활성화한 상태로 작업 화면(Model View)에서 기준이 되는 절점(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 (P_0): 0 kN/m²
 - Gradient Intensity (g): 124.40kN/m³
 - 실행: [Apply] 클릭



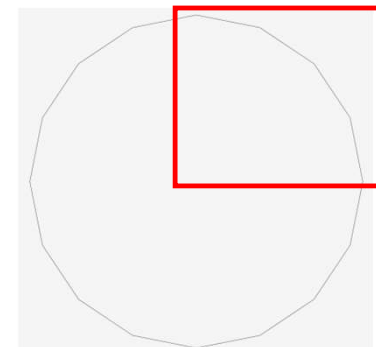
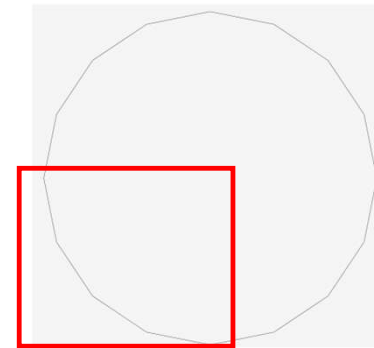
측면 매설토 하중 (Hydrostatic Pressure)

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

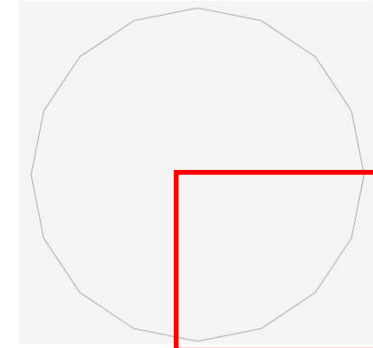
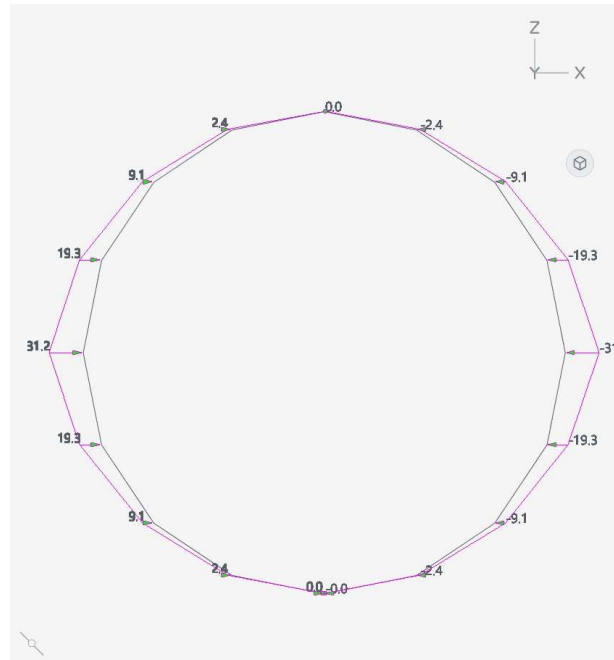
- 요소 선택: 원통의 우측 상단 1/4 구역 선택
- 하중 값 입력:
 - Reference Level (H): 0.2508 m (관의 최상단 기준)
 - Constant Intensity (P_0): 0 kN/m^2
 - Gradient Intensity (g): -124.40 kN/m^3
 - (반대 방향이므로 마이너스)
- 실행: [Apply] 클릭



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

Element Types: Plate

Selection: Node Element

Direction: Global X

Projection: Yes No

Loads

Gradient Direction: Global [-Z]

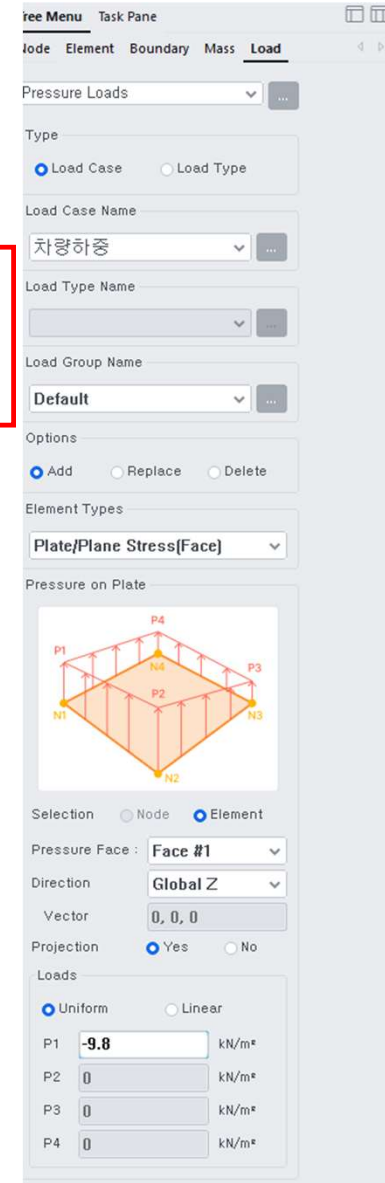
Reference Level(H): 0.2508 m

Constant Intensity(P_0): 0 kN/m^2

Gradient Intensity(g): 124.4 kN/m^3

차량 하중 (수직 상/하단)

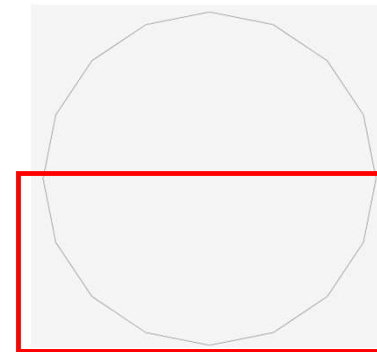
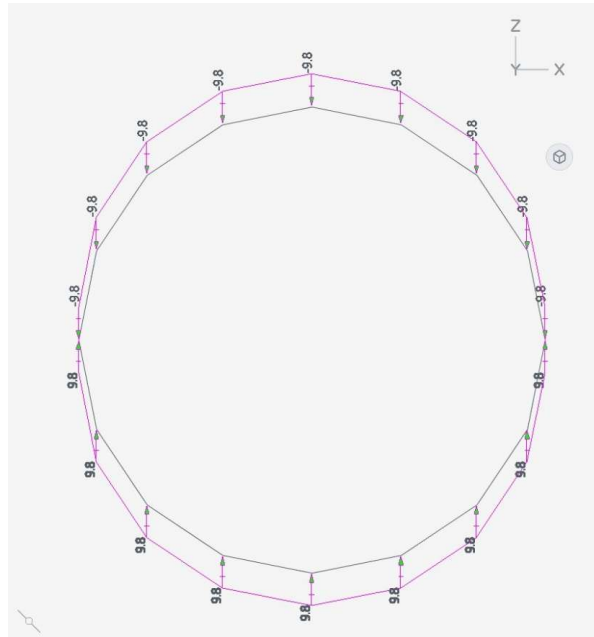
- [Load] 탭 → [Static Loads] 그룹 → [Pressure Loads]
- STEP 1: 상단 차량하중 재하
 - 요소 선택: 원통의 상단 절반(Top Half) 구역 요소 선택
 - 세부 설정 (Pressure Loads 창):
 - Load Case Name: 차량하중
 - Load Group Name: Default
 - Options: (●) Add
 - Element Types: Plate/Plane Stress(Face)
 - Selection: (●) Element
 - Pressure Face: Face #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



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



Free Menu Task Pane

Node Element Boundary Mass Load

Pressure Loads

Type

Load Case Load Type

Load Case Name

차량하중

Load Type Name

Load Group Name

Default

Options

Add Replace Delete

Element Types

Plate/Plane Stress[Face]

Pressure on Plate

Selection Node Element

Pressure Face : Face #1

Direction Global Z

Vector 0, 0, 0

Projection Yes No

Loads

Uniform Linear

P1 -9.8 kN/m²

P2 0 kN/m²

P3 0 kN/m²

P4 0 kN/m²

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

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

$$16.072 = g \times 0.5016$$

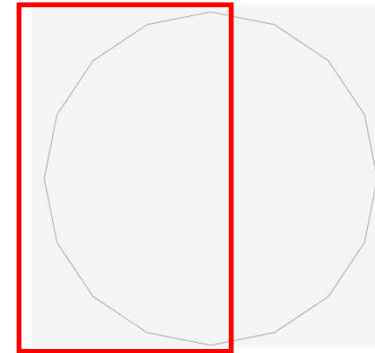
$$g = 32.041$$

차량 하중 (수평)

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

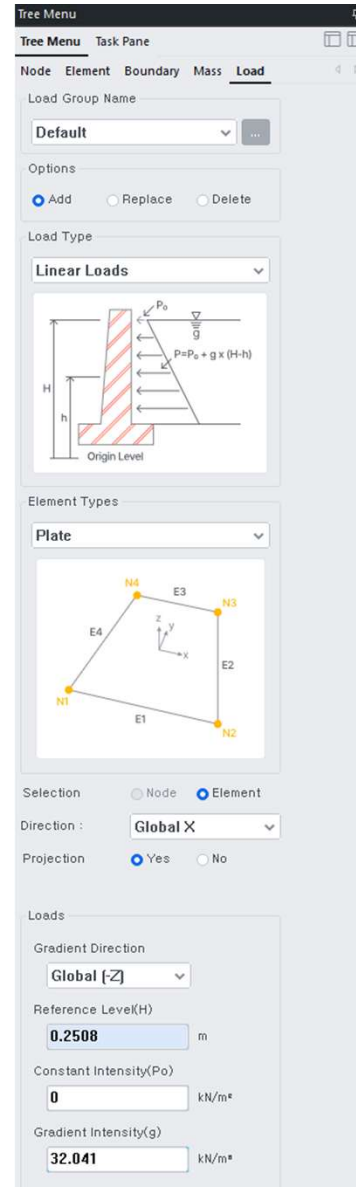
2. 공통 설정:

- 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

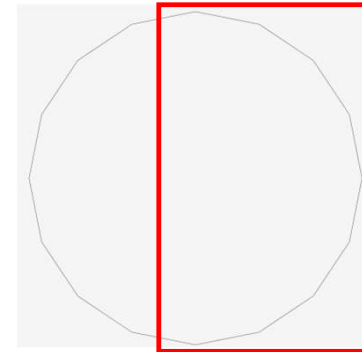
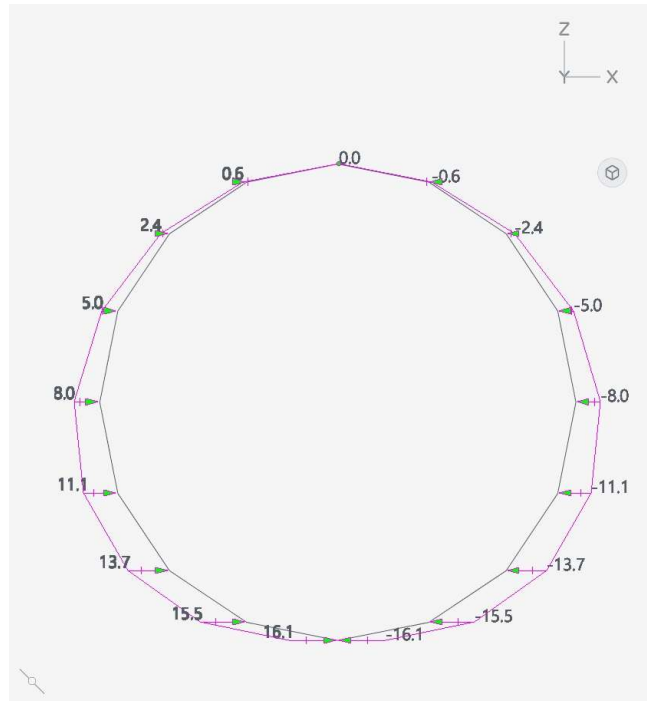
- 요소 선택: 원통의 좌측 절반(Left Half) 구역 전체 요소 선택
- 하중 값 입력:
 - Gradient Intensity (g): 32.041 kN/m^3 (플러스 값: 좌측에서 우측(+X)으로 미는 방향)
- 실행: [Apply] 클릭



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



Tree Menu Task Pane

Node Element Boundary Mass **Load**

Load Group Name: Default

Options: Add Replace Delete

Load Type: Linear Loads

Element Types: Plate

Selection: Node Element

Direction: Global X

Projection: Yes No

Loads

Gradient Direction: Global [-Z]

Reference Level(H): 0.2508 m

Constant Intensity(P0): 0 kN/m²

Gradient Intensity(g): 32.041 kN/m³

CIVIL NX 구조해석

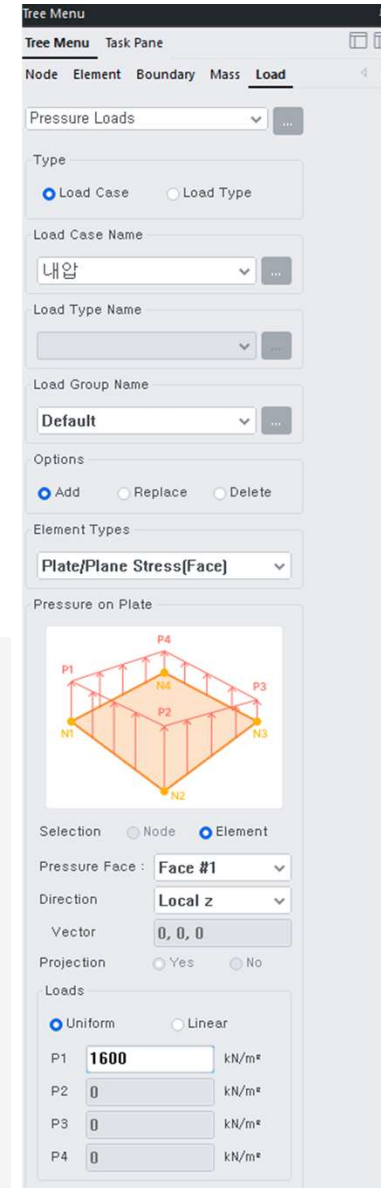
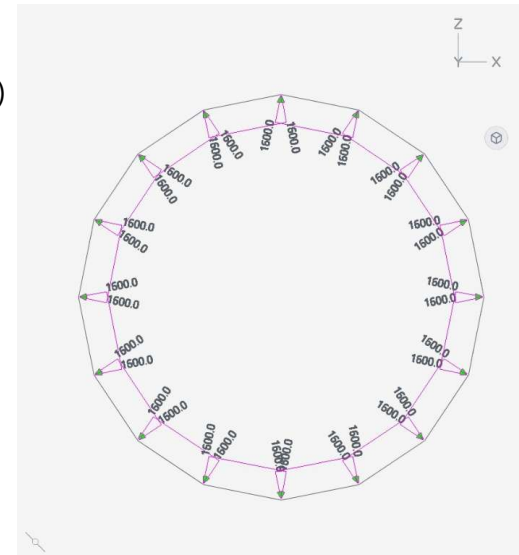
하중 화살표 방향 확인

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 변환을 통해 요소 좌표계를 변환하거나, 하중 값을 -1600으로 수정해서 다시 재하해야 올바른 내압 거동이 해석됩니다.

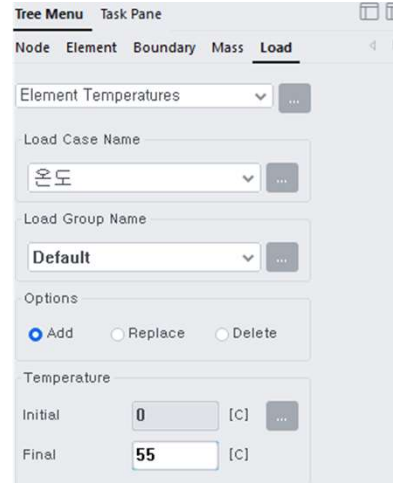
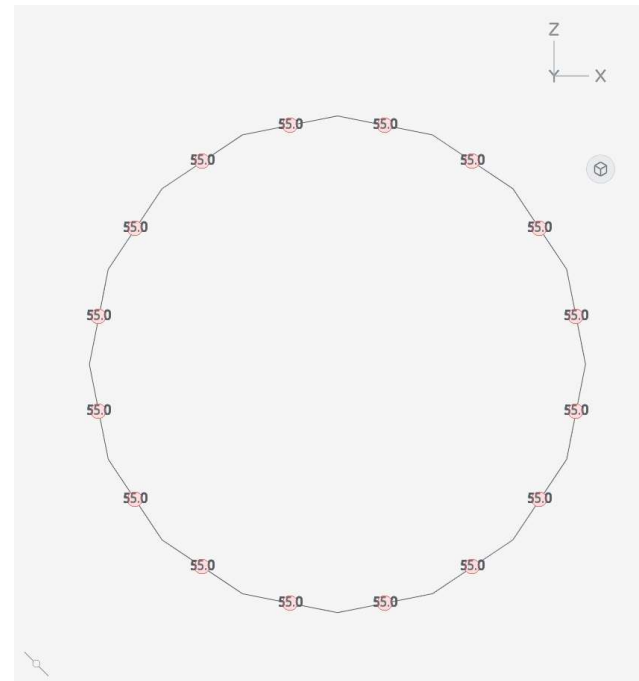
내압(Internal Pressure)

- [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



온도하중(Element Temperatures)

1. [Load] 탭 → [Temperature] 그룹 → [Element Temp.] 아이콘 클릭
2. 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



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)	매설토하중 SIDE(ST)	차량하중(ST)	차량하중 SIDE(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

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

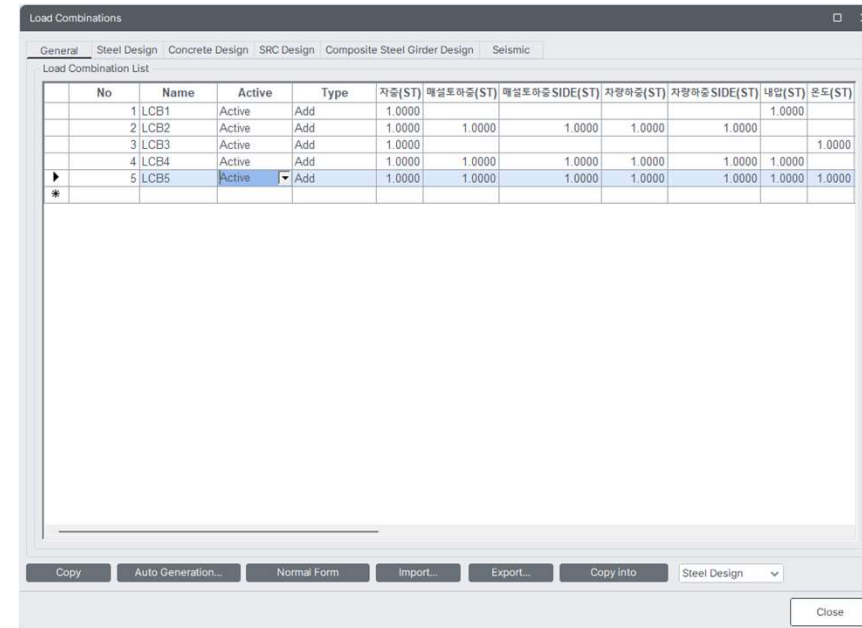
No	Name	Active	Type	자중(ST)	매설토하중(ST)	매설토하중 Side(ST)	차량하중(ST)	차량하중 Side(ST)	내압(ST)	온도(ST)
1	LCB1	Active	Add	1.0000						1.0000
2	LCB2	Active	Add	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		1.0000	
3	LCB3	Active	Add	1.0000						1.0000
4	LCB4	Active	Add	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5	LCB5	Active	Add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

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



CIVIL NX 구조해석

비선형 지지조건을 고려한 동시재하 하중 해석

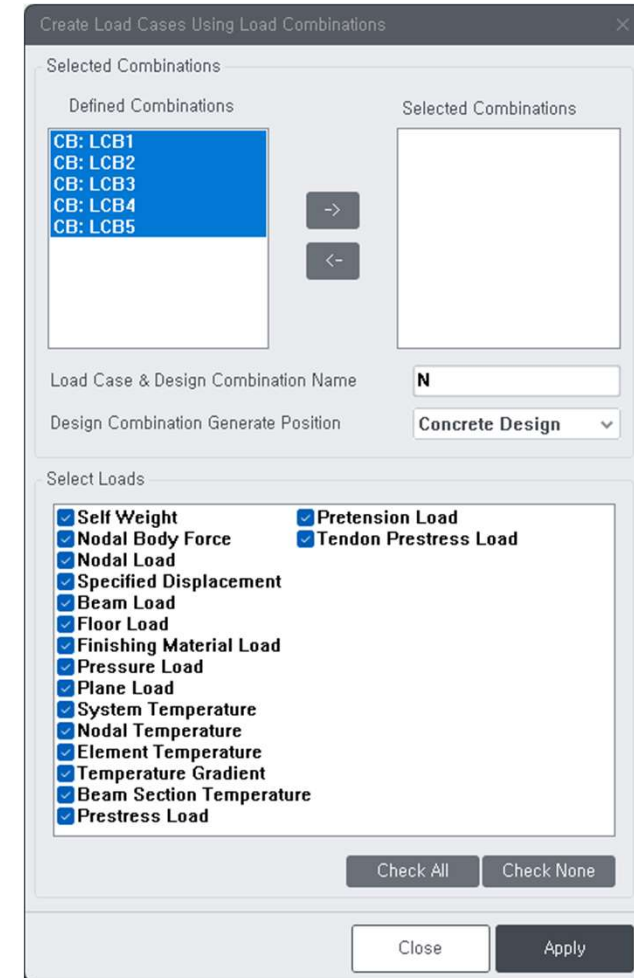
- **선형 중첩의 원리 적용 불가:** 지반 반력을 모사하는 압축 전담 스프링(Compression-only Spring)은 인장 시 저항을 상실하는 비선형적 거동을 보입니다. 따라서 개별 하중에 대한 선형 해석 결과를 단순 합산(Load Combination)하는 방식은 지반의 실제 거동을 왜곡하므로 지양해야 합니다.
- **동시재하 하중 해석:** 다양한 하중(자중, 토압, 차량, 내압, 온도)이 복합적으로 작용하는 극한 상태의 거동을 평가하기 위해서는, 전체 설계 하중을 묶어 하나의 정적 하중 케이스(Static Load Case)로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



Civil NX

결과분석

Result Verification

Civil NX에서 내압응력과 외압응력을 추출하고, 계산서 산정식과 비교하여 결과를 검토한다

응력 성분(Components)

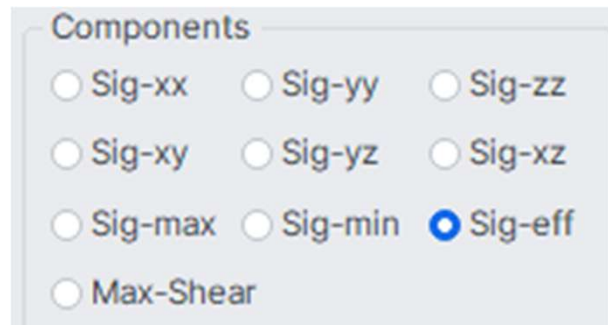
해석 목적과 예상되는 파괴 모드(Failure Mode)에 맞춰 적절한 응력 성분을 선택하여 검토

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.



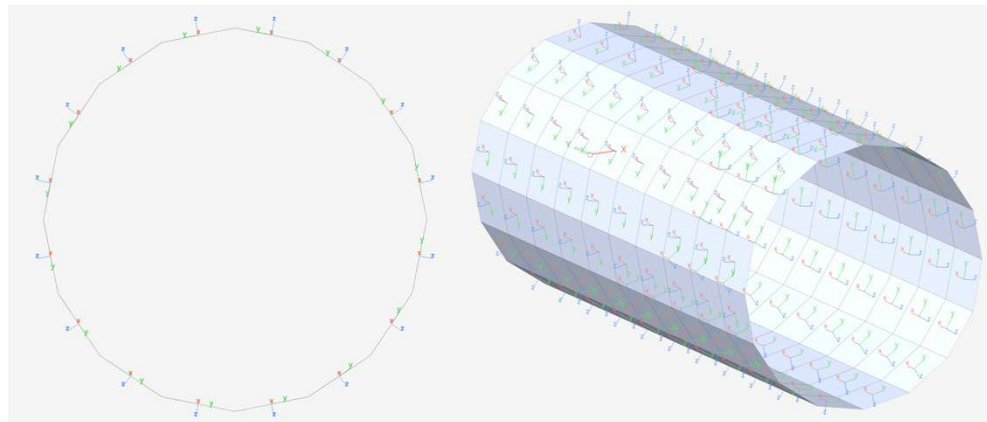
응력 성분(Components)

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.

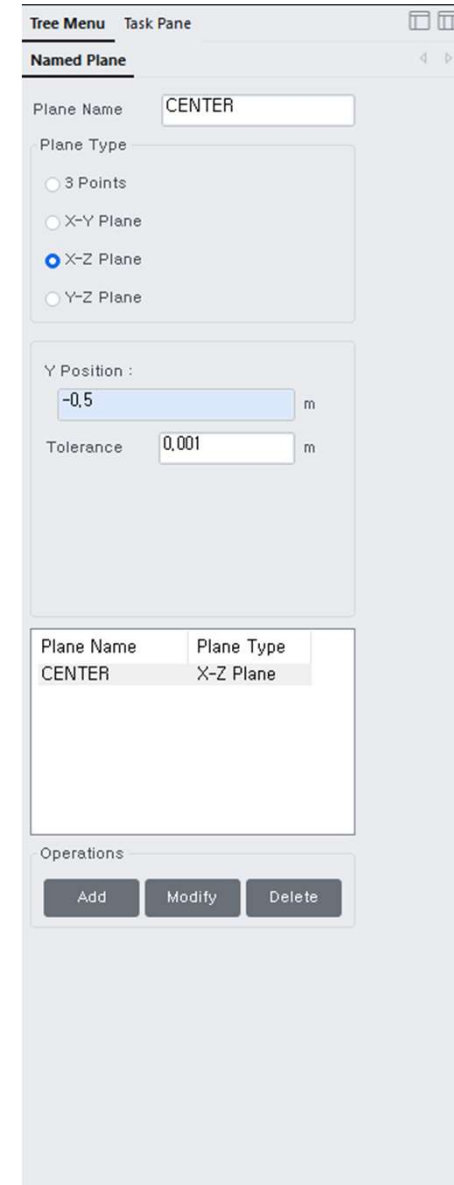
4. 종합 파손 지표 (Failure Criteria) : 연성/취성재의 항복 및 파괴 판정

- **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-미제스(von-Mises)보다 더욱 보수적으로 평가하고자 할 때 설계 지표로 활용.



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



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	$S.F < 1.0$	

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): 지정된 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

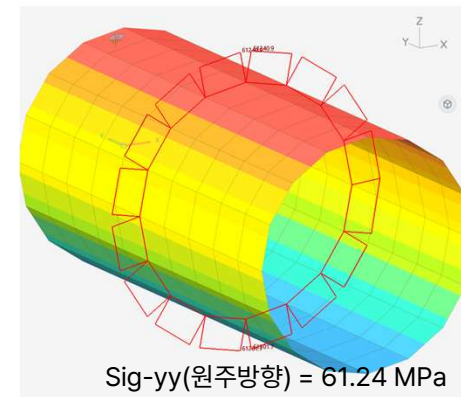
내압 조건(NLCB1) 원주 방향 응력 검토

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 (셸 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,

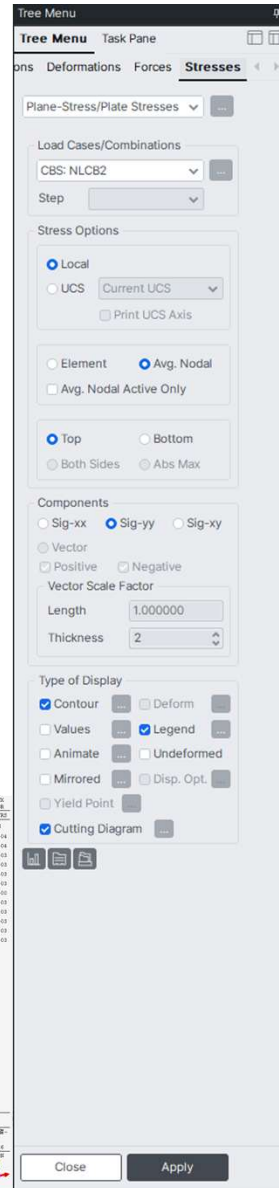
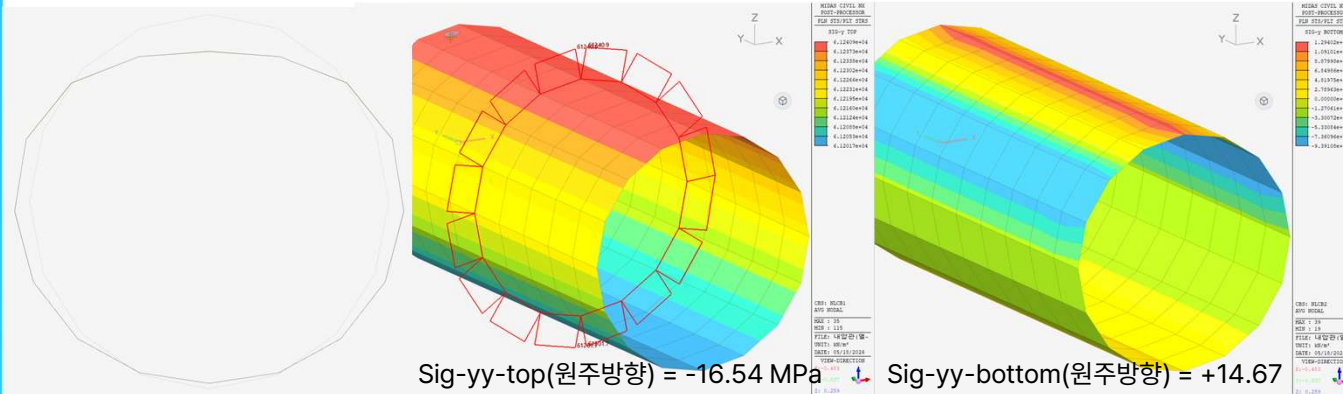
$$\sigma_p \approx 61.90MPa$$



외압 조건(NLCB2) 원주 방향 응력 검토

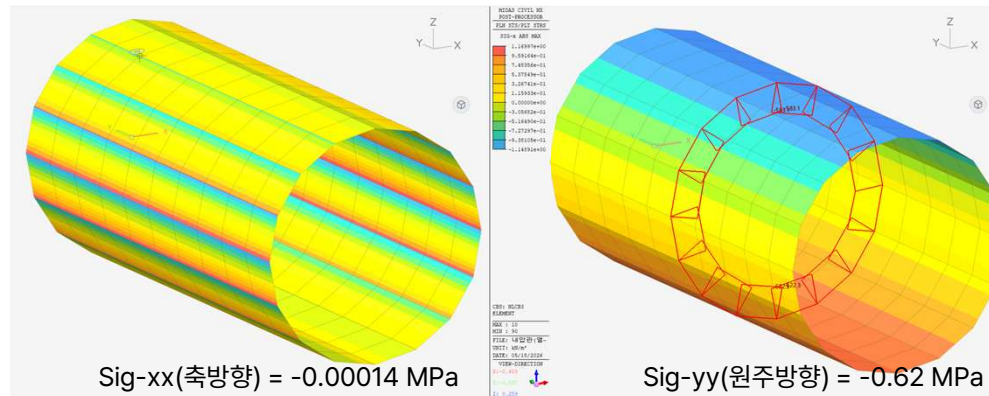
- [Results] 탭 → [Result Display] → [Stresses] → [Plane-Stress/Plate Stresses]
- 해석 결과 출력 설정
- Load Cases/Combinations: CBS: NLCB2 (자중+매설토+차량하중)
- Stress Options (응력 산출 기준):
 - 좌표계: (●) Local (개별 요소 자체 좌표계 기준)
 - 데이터 위치: (●) Avg. Nodal (절점 평균 응력)
 - 출력 위치: (●) Top (셸 상부면), and (●) Bottom (셸 하부면)
- Components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

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



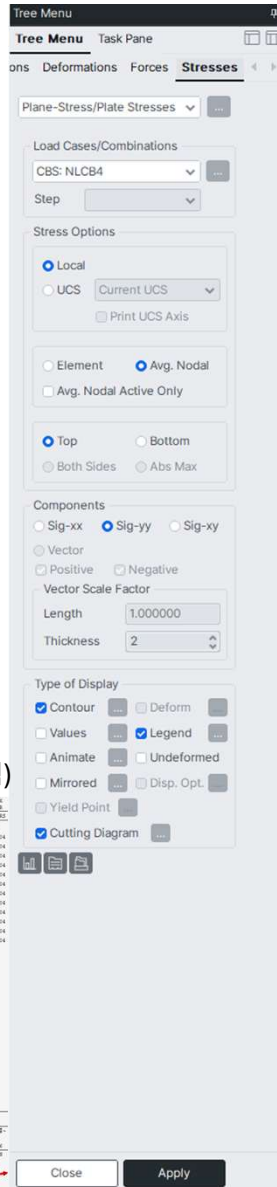
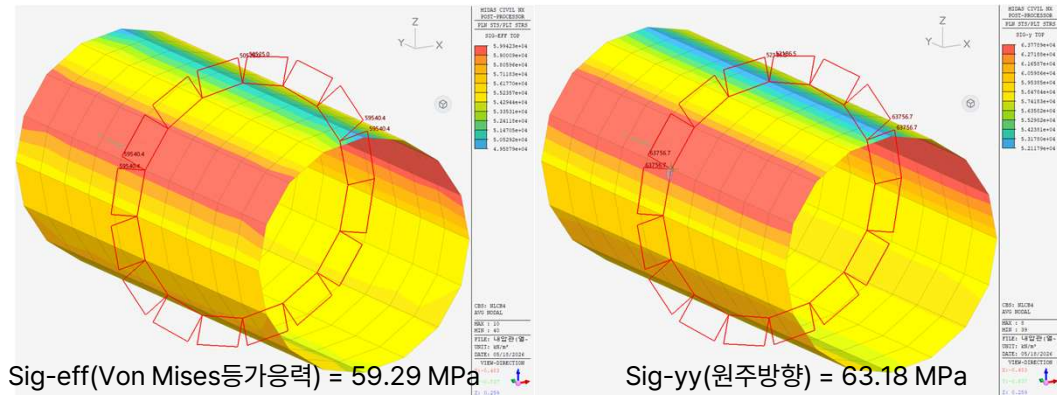
온도(NLCB3) 축 방향, 원주 방향 응력 검토

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



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

- [Results] 탭 → [Result Display] → [Stresses] → [Plane-Stress/Plate Stresses]
- 해석 결과 출력 설정
- Load Cases/Combinations: CBS: NLCB5 (자중+외압+내압+온도)
- Stress Options (응력 산출 기준):
 - 좌표계: (●) Local (개별 요소 자체 좌표계 기준)
 - 데이터 위치: (●) Avg. Nodal (절점 평균 응력)
 - 출력 위치: (●) Top (셸 상부면)
- Components (응력 성분):
 - (●) Sig-yy (Hoop Stress), (●) Sig-eff (Von mises 등가 응력)
- 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)



CIVIL NX

결과분석

안전율 S.F계산

안전율은 다음 식으로 계산합니다.

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

$$f_a = 400MPa$$

$$f_1 = 61.24MPa$$

$$f_2 = 16.54MPa$$

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

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

$$S.F = 5.143$$

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	$S.F < 1.0$

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

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

Thank You!