



2017

액화천연가스 운반선 펌프타워
구조강도평가 지침

GC-20-K

한 국 선 급

“액화천연가스 운반선 펌프타워 구조강도평가 지침”의 적용

이 지침은 별도로 명시하는 것을 제외하고 2017년 7월 1일 이후 건조 계약되는 액화천연가스 운반선에 적용한다.

차 례

제 1 장 일반사항	1
제 1 절 일반사항	1
제 2 절 소개	1
제 3 절 동등 효력	3
제 4 절 제출 자료	3
제 2 장 펌프타워 하중	5
제 1 절 일반사항	5
제 2 절 하중	5
제 3 장 구조강도평가	7
제 1 절 구조 모델링	7
제 2 절 경계조건	8
제 3 절 강도평가	9

제 1 장 일반사항

제 1 절 일반사항

101. 적용

1. 이 지침은 멤브레인 액화천연가스(LNG) 운반선의 펌프타워 구조강도평가에 적용한다.
2. 이 지침의 요건은 선급 및 강선규칙의 다른 요건에 추가하여 적용한다.

제 2 절 소개

201. 개요

1. 펌프타워 시스템은 파이프 및 액체 화물을 적하하는 펌프 및 구조를 지지하는 관 부재로 이루어져 있다. (그림 1 참조) 펌프타워는 화물창의 후방 격벽 근처에 위치하여, 리퀴드 돔(liquid dome)을 지지하며 탱크 하부에서 지지부와 연결된다. 또한, 하부에는 하역을 위해 펌프가 설치된다. 펌프타워 시스템의 구조적 완전성은 액화천연가스 운반선의 안정적인 운용에 필요하다.
2. 펌프타워는 화물창내의 극저온 화물에 노출되기 때문에 열 응력이 발생하고 이에 대한 고려가 지지부에서 적절히 이루어져야 하며, 화물창 안에서의 LNG 유동과 선박의 운동에 의한 하중도 고려가 되어야 한다.
3. 펌프타워 시스템의 구조 설계 승인은 일반적으로 설계자가 제공하는 해석 및 평가에 기초하여 수행된다.

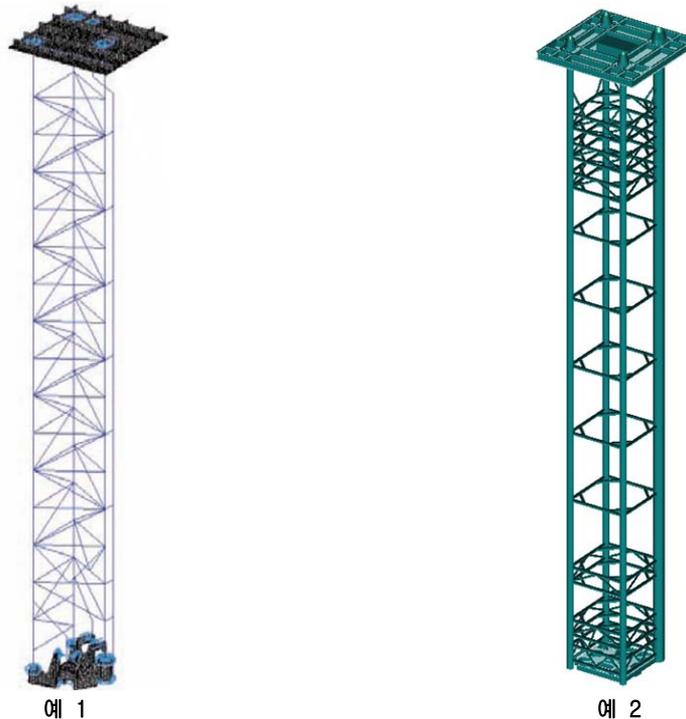


그림 1 펌프타워 시스템의 예

202. 펌프타워 평가 절차

본 지침의 해석 절차는 펌프타워의 설계 수명 중의 임계 슬로싱 하중을 도출하고 그 하중이 적용된 상태에서 펌프타워의 구조적 건전성을 평가하는 것을 기반으로 한다. 펌프타워 강도평가에 대한 전체적인 해석 절차는 그림 2와 같다.

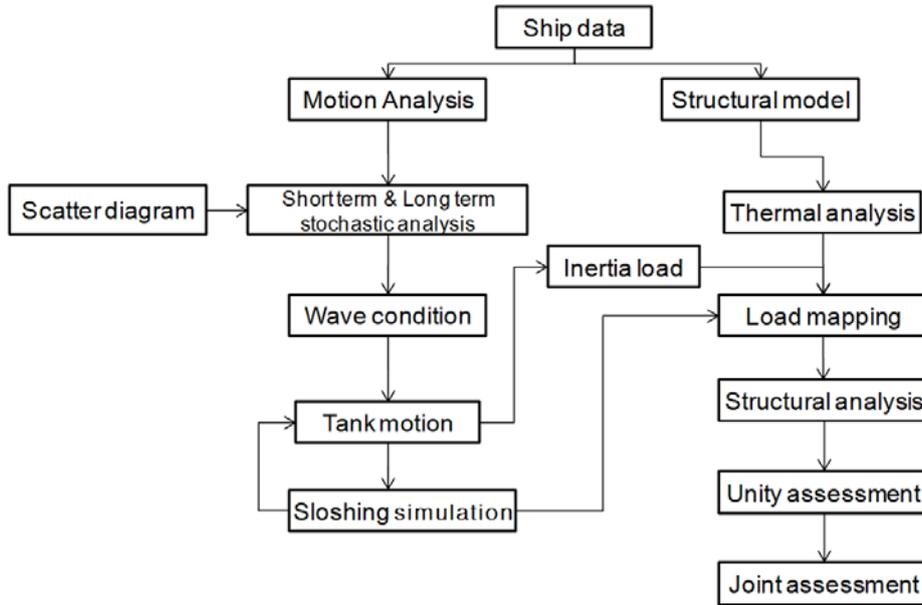


그림 2 펌프타워 강도평가에 대한 해석 절차

203. 펌프타워 구조 평가

1. 선체 운동 해석

슬로싱 하중 평가 지침/화물격납설비 강도 평가 지침에 따른다.

2. 임계 슬로싱 파랑 상태 선정

슬로싱 하중 평가 지침/화물격납설비 강도 평가 지침에 따른다.

3. 슬로싱 해석

슬로싱 하중 평가 지침/화물격납설비 강도 평가 지침에 따른다.

4. 구조 해석을 위한 하중 선정

2장 2절에 따른다.

5. 펌프타워 구조 유한 요소 해석

펌프타워 구조는 판, 셸(shell) 혹은 보 요소 등을 사용하여 적절하게 모델링해야 한다. 펌프타워의 상부 끝단 및 하부 끝단의 경계조건을 특별히 고려해야 한다. 펌프타워 상부의 리퀴드 돔 구조를 구조 모델에 포함하여 상부 경계 조건을 정확하게 정의해야 한다.

6. 허용 기준

3장 3절에 따른다.

7. 피로 해석

펌프타워 피로 평가는 핫스팟응력방법(Hot spot stress approach)에 기초해야 한다. 관 결합부와 같은 구조부에 대해서 피로 해석을 수행하여야 한다. 적절한 동적 하중을 고려해야 하며 적절한 응력집중계수를 응력 계산에서 적용해야 한다.

8. 진동 해석

주엔진 및 프로펠러에 인한 펌프타워 자유 진동 및 강제 진동(필요시)을 고려해야 한다. 리퀴드 돔, 지지판, 혹은 관결합부에서 균열같은 구조 손상 위험을 감소시키기 위해서 과도한 진동을 피해야 한다. 펌프타워 진동의 허용 기준은 국부 구조물의 진동 한계값으로 제시해야 한다.

제 3 절 동등 효력

301. 동등 효력

이 지침에 규정되어 있지 아니한 특수한 방법, 절차라도 우리 선급이 이 지침에 적합하다는 것과 동등이상의 효력이 있다고 인정하는 경우에는 이것을 이 지침에 적합한 것으로 본다.

제 4 절 제출 자료

401. 제출 자료

다음 자료를 제출하여 우리 선급의 검토를 받아야 한다. 또한, 우리 선급이 필요하다고 인정하는 경우에는 아래에 규정된 것 이외의 자료의 제출을 요구할 수 있다.

1. 운동 해석 자료

- (1) 운동 해석 입력(적하상태, 홀수, 메타센터 높이 및 선체 무게 중심 등) 자료
- (2) 운동 해석 모델 자료
- (3) 운동 해석 상세 해석 결과
- (4) 모형 실험을 위한 임계 해상 상태 및 파랑 상태 분석 자료

2. 전산유체역학 자료

- (1) 전산유체역학 소프트웨어 검증 자료
- (2) 임계 슬로싱 파랑 상태 자료
- (3) 전산유체역학 해석 모델
- (4) 전산유체역학 해석 결과
- (5) 설계 슬로싱 하중 분석 자료

3. 펌프타워 구조평가 자료

- (1) 펌프타워 모델링 및 구조 해석
- (2) 피로 해석 결과
- (3) 진동 해석 결과

4. 기타 자료

- (1) 선체의 주요 제원
- (2) 냉각속도(Cooling down speed), 화물의 적재 제한 높이 등의 화물 운용상의 제한 조건
- (3) 각 화물창에서 화물격납설비 배치도
- (4) 화물격납설비가 설치된 상태의 선체 일반 배치도
- (5) 화물격납설비의 설계 제한 조건

제 2 장 펌프타워 하중

제 1 절 일반사항

101. 일반사항

펌프타워 구조강도평가에는 슬로싱 하중, 열 하중, 관성력 및 탱크 내부 압력 등이 적용되어야 한다. 선박이 항해 중 일 때는 펌프가 사용되지 않으므로 펌프 토크는 별도로 고려되어야 한다.

제 2 절 하중

201. 슬로싱 하중

선박의 운동 해석 및 슬로싱 전산유체해석을 통하여 구해진 유체에 의한 슬로싱 하중은(그림 3 참조) 횡방향과 종방향으로 각각 최대값을 갖는 순간을 선택하여 그 때의 하중 분포를 구조물에 가해야 한다. 이 때 유체에 의한 하중은 모리슨 식을 이용하여 하중을 계산한다. 펌프타워 구조물에 하중을 가할 때도 같은 방법으로 모리슨 식을 이용하여 분포 하중으로 가한다. 펌프타워 위치에서의 높이에 따른 유체 가속도, 속도를 구하여 구조물의 단위 길이당 슬로싱 하중을 계산한다. 펌프타워에 가해지는 슬로싱 하중을 위한 모리슨 식은 다음과 같다.

$$\frac{dF_s}{ds} = \frac{1}{2}\rho_L C_D U_n |U_n| D_{mem} + \rho_L C_M \frac{dU_n}{dt} A_{mem}$$

dF_s/ds : 유체에 의한 단위 길이당 슬로싱 하중 (N/mm)

s : 구조물의 길이 좌표

ρ_L : 유체의 밀도(ton/mm^3)

U_n : 구조물의 수직 방향에 대한 유체의 속도(mm/s)

dU_n/dt : 구조물의 수직 방향에 대한 유체의 가속도(mm/s^2)

C_D : 항력 계수, 실린더의 경우 0.7

C_M : 관성 계수, 실린더의 경우 2.0

D_{mem} : 구조물의 직경(mm)

A_{mem} : 구조물의 수직단면적(mm^2)

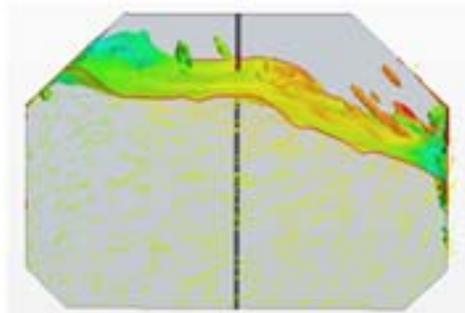


그림 3 CFD를 이용한 슬로싱 시뮬레이션

202. 열 하중

펌프타워의 길이가 부재 단면적에 비하여 매우 길기 때문에 열에 의한 팽창 또는 수축은 주요 하중 인자이다. 그림 4에서와 같이 LNG의 적재 높이에 따라 LNG와 직접 맞닿는 부분까지의 온도를 -163 °C로, 탱크 상부 리퀴드 돔 하부면은 -30 °C로 가정한다. 그리고, LNG의 자유 표면에서부터 탱크 상부 리퀴드 돔 하부면까지는 선형적으로 분포한다고 가정한다.

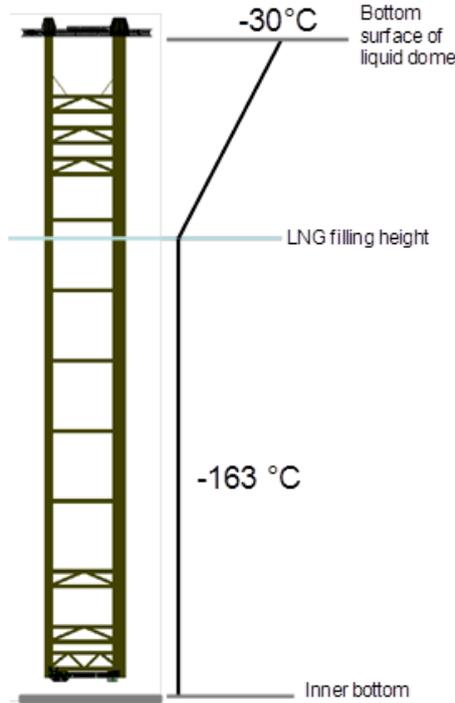


그림 4 온도 분포 가정

203. 관성 하중

최대 슬로싱 하중이 나타나는 시간에서 선박의 운동에 기인한 관성력을 계산하여 펌프타워 자체에 적용하여야 한다. 관성력은 선박의 병진 가속도, 회전 가속도에 의한 탱크내 위치에서의 가속도, 그리고 종동요 (Pitch) 및 횡동요(Roll) 각도에 의한 자중 성분으로 이루어진다.(슬로싱 하중 평가 지침/화물격납설비 강도 평가 지침 참조)

204. 탱크 내부 압력

화물창 내에 존재하는 증기 압력이 리퀴드 돔 커버 하부에 가해지게 된다. 일반적으로 0.25 bar 이상(IGC 코드 참조)을 정압력(static pressure)으로 고려한다. ↓

제 3 장 구조강도평가

제 1 절 구조 모델링

101. 해석 모델 범위 및 구조 모델링

펌프타워 구조물은 리퀴드 돔 커버, 관 부재, 하부 지지부 등으로 구성이 된다(그림 5 참조). 관 부재들에 대한 강도 평가를 위해서는 리퀴드 돔 커버와 하부 지지부가 모델에 포함되어야 한다. 리퀴드 돔 커버는 선박의 화물창 해치 코밍부에 연결이 되고 하부 지지부는 내저판에 고정된 또 다른 지지부와 연결이 되는데, 관 부재들의 평가를 위해서는 하부 지지부에 대한 모델만으로 충분하다. 리퀴드 돔 커버와 하부 지지부에 대한 강도 평가는 별도의 모델과 경계 조건에서 평가하여야 한다.

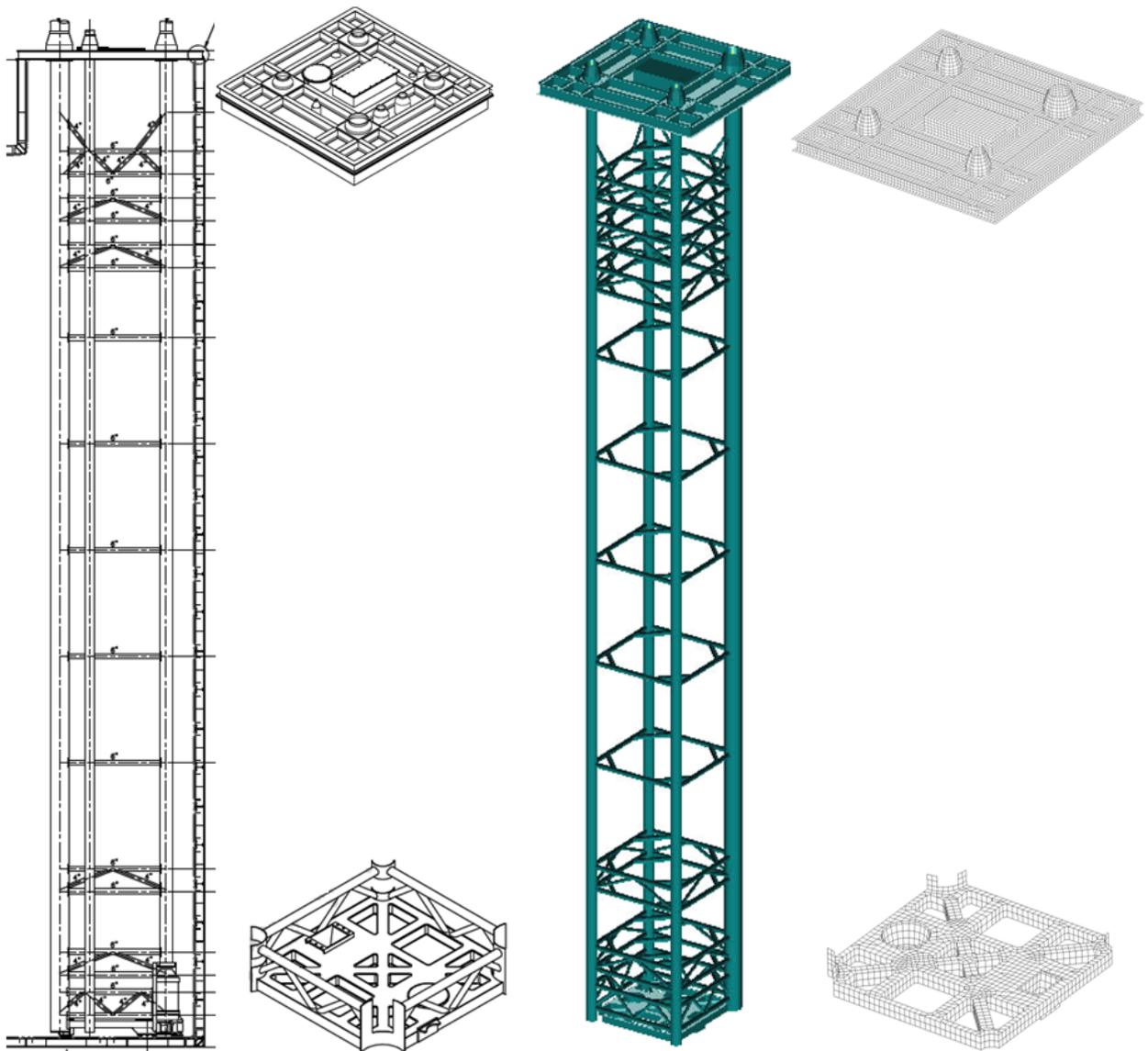


그림 5 펌프타워 모델 예

- 리퀴드 돔 커버와 하부 지지부는 판 요소를 사용하여 모델링하며 요소 크기는 형상을 충분히 표현할 정도이어야 하며 최대 100 mm x 100 mm 사이즈로 한다. 판 부재는 보 요소로 모델링한다.
판 부재와 리퀴드 돔 커버가 용접되는 부위, 하부 지지부와 판 부재가 접하는 부위들은 판 요소와 보 요소로 모델링되기 때문에 강체 연결(rigid link) 요소를 사용한다.
- 펌프타워 구조에는 일반적으로 300 시리즈 스테인리스강이 사용된다. 탄성 계수와 열팽창 계수 등 해석에 사용되는 물성치를 표 1에 표기하였다(예: 304L 스테인리스강). 온도에 대한 의존성이 있는 탄성 계수와 열팽창 계수는 표 1에서 제시한 온도에 대한 값을 이용하여 선형 내삽으로 계산한다.

표 1 304L 스테인리스강의 재료 물성치

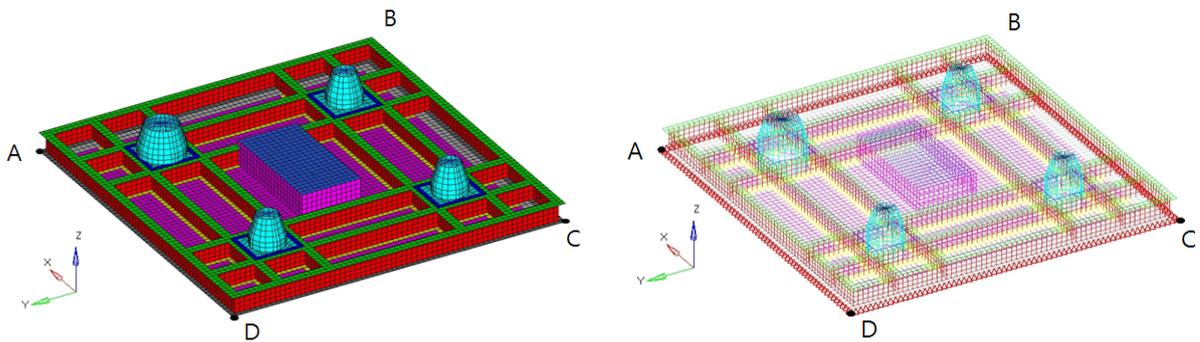
탄성계수	193 GPa (20 °C) 203 GPa (-163 °C)
프아송 비(Poisson's ratio)	0.3
밀도	7.85×10^{-9} ton/mm ³
열팽창계수	-185°C : 1.33×10^{-5} mm/mm/°C -130°C : 1.39×10^{-5} mm/mm/°C -70°C : 1.48×10^{-5} mm/mm/°C -20°C : 1.57×10^{-5} mm/mm/°C 0 ~ 100°C : 1.72×10^{-5} mm/mm/°C

제 2 절 경계 조건

201. 경계 조건

경계조건의 예는 다음에 따른다.

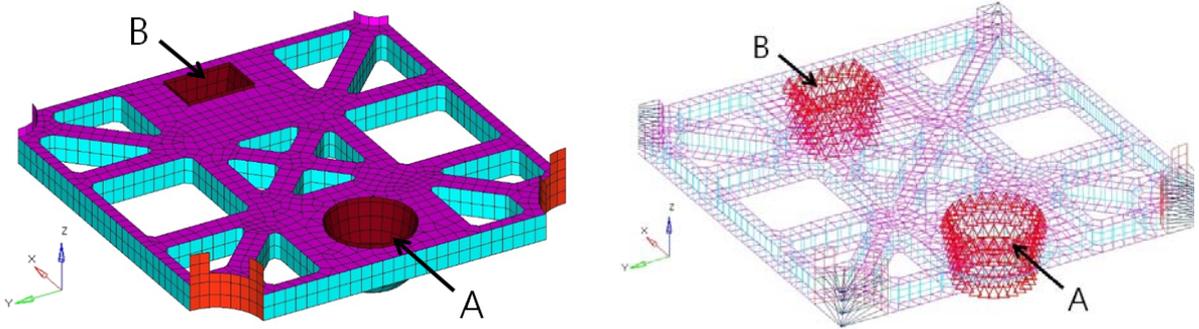
1. 리퀴드 돔 커버



경계조건의 예

위치	좌표	변위			회전 변위		
		U_x	U_y	U_z	θ_x	θ_y	θ_z
$\overline{AB}, \overline{BC}, \overline{CD}, \overline{DA}$		1	1	1	1	1	1
(비고)		1 : 구속 0 : 자유					

2. 하부 지지부



경계조건의 예

위치 \ 좌표	변위			회전 변위		
	U_x	U_y	U_z	θ_x	θ_y	θ_z
A(주 하부 지지부)	1	1	0	1	1	0
B(부 하부 지지부)	0	1	0	1	0	1
(비고)	1 : 구속 0 : 자유					

제 3 절 강도 평가

301. 관 부재

관 부재에 대한 강도 평가는 항복 및 좌굴 등에 대하여 수행한다. 펌프타워에 쓰이는 재질에 대한 실험 자료에 기초한 접근법이 있다면 이를 바탕으로 허용기준을 정해야 한다. 상세 해석이 가능하지 않은 경우, 다음의 식을 이용하여 관 부재의 항복 및 좌굴강도를 평가한다.

1. 축 인장력 및 전단력

$$\sigma_{a-t} \leq \eta_a \sigma_y$$

- σ_{a-t} : 인장응력(유한요소해석으로부터 얻어진 값)
- η_a : 0.9 (직응력의 경우), 0.52 (전단응력의 경우)
- σ_y : 170 (N/mm²)

2. 축 압축력

$$\sigma_{a-c} \leq \eta_a \sigma_{cr}$$

- σ_{a-c} : 압축응력(유한요소해석으로부터 얻어진 값)
- η_a : 0.783 ($\sigma_{el} \leq \sigma_y$ 인 경우)
 $0.9 - 0.0827 \sqrt{\sigma_y / \sigma_{el}}$ ($\sigma_{el} > \sigma_y$ 인 경우)

σ_{el} : 탄성좌굴응력(N/mm²)으로 다음 식에 따른다.

$$\sigma_{el} = \pi^2 E / \left(\frac{k\ell}{r} \right)^2$$

E : 스테인리스강의 탄성계수(N/mm²)

k : 1.0 (filling, discharge, emergency pipe 의 경우)
0.8 (brace, strut 의 경우)

ℓ : 부재의 길이 (mm)

r : 최소 회전반지름 (mm)으로 다음 식에 따른다.

$$r = \sqrt{I/A}$$

I : 관성모멘트 (mm⁴)

A : 단면적 (mm²)

σ_{cr} : 임계좌굴응력(N/mm²)으로 다음 식에 따른다.

$$\sigma_{cr} = \pi^2 E_t / \left(\frac{k\ell}{r} \right)^2$$

E_t : 스테인리스강의 접선계수(N/mm²)로 다음 식에 따른다.

$$E_t = E \left[1 + 0.002 \frac{E n}{\sigma_y} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} \right)^{n-1} \right]^{-1}$$

n : knee factor 로서 7.2로 한다.

3. 굽힘응력

$$\sigma_{b_act} \leq \eta_b \sigma_b$$

σ_{b_act} : 굽힘응력(유한요소해석으로부터 얻어진 값)으로 다음 식에 따른다.

$$\sigma_{b_act} = M / Z_e$$

M : 굽힘모멘트 (N-mm)

Z_e : 탄성단면계수(mm³)로 다음 식에 따른다.

$$Z_e = (\pi/64) [D^4 - (D-2t)^4] / (D/2)$$

D, t : 그림 6에 따른다. (mm)

η_b : 0.9

σ_b : 굽힘강도(N/mm²)로 다음 식에 따른다.

$$\sigma_b = (Z_p/Z_e) \sigma_y \quad (\sigma_y D / (Et) \leq 0.02 \text{ 인 경우})$$

$$\sigma_b = [1.038 - 1.9 \sigma_y D / (Et)] (Z_p/Z_e) \sigma_y \quad (0.02 < \sigma_y D / (Et) \leq 0.1 \text{ 인 경우})$$

$$\sigma_b = [0.921 - 0.73 \sigma_y D / (Et)] (Z_p/Z_e) \sigma_y \quad (\sigma_y D / (Et) > 0.1 \text{ 인 경우})$$

Z_p : 소성단면계수(mm^3)로 다음 식에 따른다.

$$Z_p = (1/6)[D^3 - (D - 2t)^3]$$

4. 조합 응력(인장과 굽힘 응력)

$$[\sigma_{a-t}/(\eta_a \sigma_y)] + [\sigma_{b-act}/(\eta_b \sigma_b)] \leq 1$$

5. 조합 응력(압축과 굽힘 응력)

$$[\sigma_{a-c}/(\eta_a \sigma_{cr})] + [C_m \sigma_{b-act}/\{\eta_b \sigma_b(1 - \sigma_{a-c}/(\eta_a \sigma_{el}))\}] \leq 1 \quad ((\sigma_{a-c}/\sigma_{cr}) > 0.15 \text{ 인 경우})$$

$$[\sigma_{a-c}/(\eta_a \sigma_{cr})] + [\sigma_{b-act}/(\eta_a \sigma_b)] \leq 1 \quad ((\sigma_{a-c}/\sigma_{cr}) \leq 0.15 \text{ 인 경우})$$

C_m : 0.85 또는 $1 - 0.4[\sigma_{a-c}/(\eta_a \sigma_{el})]$ 중에서 작은 값

6. 국부 좌굴

$$\sigma_{a-b} \leq \eta_{local} \sigma_{local}$$

$$\sigma_{a-b} = \sigma_{a-c} + \sigma_{b-act}$$

η_{local} : 0.75 ($\sigma_{local} \leq 0.55 \sigma_y$ 인 경우)

0.566 + 0.334 σ_{local}/σ_y ($\sigma_{local} > 0.55 \sigma_y$ 인 경우)

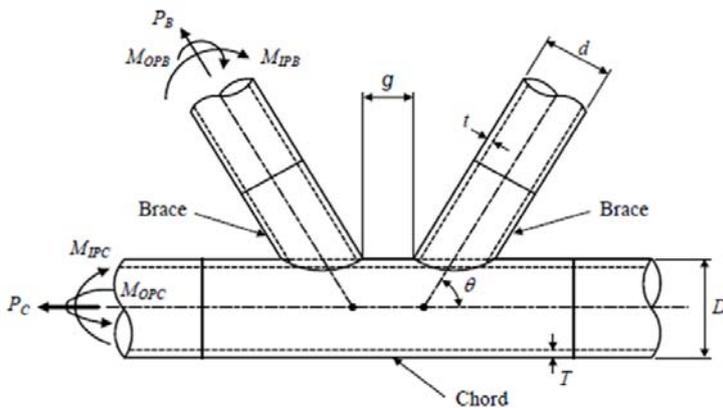
σ_{local} : 임계국부좌굴응력으로 다음 식에 따른다.

$$= 0.6 E_t t/D$$

302. 관 결합부

관 결합부는 코드(Chord)와 브레이스(Brace)가 용접되는 부위를 말하며, 형상 및 하중 형태에 따라 T, Y 혹은 K 형태로 분류한다.

관 결합부에 대한 평가는 굽힘, 편칭 전단, 축 응력을 고려하여 평가하여야 한다. 그림 6은 관 결합부에 작용하는 힘과 일반적인 형상을 보여주고 있다.



θ : 코드로부터 측정된 브레이스의 각도
 g : 갭(gap)
 γ : $D/(2T)$
 β : d/D

그림 6 관 결합부 형상 및 기하학적 변수들

1. 관 결합부의 강도는 다음 식을 만족하여야 한다.

$$\left| \frac{F_A}{\mu F_{U-A}} \right| + \left(\frac{M_{IPB}}{\mu M_{U-IPB}} \right)^2 + \left| \frac{M_{OPB}}{\mu M_{U-OPB}} \right| \leq 1$$

- F_A : 브레이스 축 하중 (N)
- M_{IPB} : 브레이스 면내 굽힘모멘트 (N-mm)
- M_{OPB} : 브레이스 면외 굽힘모멘트 (N-mm)
- μ : 안전 계수로 0.9
- F_{U-A} : 브레이스 축 강도(N)
- M_{U-IPB} : 브레이스 면내 굽힘모멘트 강도 (N-mm)
- M_{U-OPB} : 브레이스 면외 굽힘모멘트 강도 (N-mm)

$$F_{U-A} = \frac{\sigma_y T^2}{\sin\theta} Q_u Q_f$$

$$M_{U-IPB} \text{ 또는 } M_{U-OPB} = \frac{\sigma_y T^2 d}{\sin\theta} Q_u Q_f$$

- F_{U-A} : 브레이스 축 강도(N)
- M_{U-IPB} : 브레이스 면내 굽힘모멘트 강도(N-mm)
- M_{U-OPB} : 브레이스 면외 굽힘모멘트 강도(N-mm)
- θ : 그림 6에 따른다.
- σ_y : 301.의 1항에 따른다.
- Q_u : 표 2로 결정하는 결합부 하중 및 분류에 따르는 강도계수
- Q_f : 코드 하중계수로서 다음 식에 따른다.

$$Q_f = 1 - \lambda \gamma A^2$$

- λ : 0.030 (축 강도인 경우)
- 0.045 (면내 굽힘 모멘트 강도인 경우)
- 0.021 (면외 굽힘 모멘트 강도인 경우)
- γ : 그림 6에 따른다.

$$A = \frac{\sqrt{\sigma_{nominal_a}^2 + \sigma_{nominal_IPB}^2 + \sigma_{nominal_OPB}^2}}{\mu \sigma_y}$$

- $\sigma_{nominal_a}$: 코드에서의 축방향 공칭응력(N/mm²)
- $\sigma_{nominal_IPB}$: 코드에서의 면내 공칭 굽힘응력(N/mm²)
- $\sigma_{nominal_OPB}$: 코드에서의 면외 공칭 굽힘응력(N/mm²)
- μ : 안전 계수로 0.9

표 2 강도 인자, Q_u

결합부 형식	축하중		굽힘하중	
	압축	인장	면내	면외
K	$(0.5 + 12\beta)\gamma^{0.2} Q_\beta^{0.5} Q_g$	$(0.65 + 15.5\beta)\gamma^{0.2} Q_\beta^{0.5} Q_g$	$4.5\beta\gamma^{0.5}$	$3.2\gamma^{(0.5\beta^2)}$
T & Y	$(0.5 + 12\beta)\gamma^{0.2} Q_\beta^{0.5}$	$(0.65 + 15.5\beta)\gamma^{0.2} Q_\beta^{0.5}$	$4.5\beta\gamma^{0.5}$	$3.2\gamma^{(0.5\beta^2)}$

$$Q_\beta = 0.3 / [\beta(1 - 0.833\beta)] \quad \beta > 0.6 \text{인 경우}$$

$$= 1.0 \quad \beta \leq 0.6 \text{인 경우}$$

$$Q_g = 1 + 0.85e^{(-4g/D)} \quad g/D \geq 0 \text{인 경우}$$

g : 그림 6에 따른다. (mm)

γ, β : 그림 6에 따른다.

303. 리퀴드 돔 커버 및 하부 지지부

1. 유한요소 모델

리퀴드 돔 커버 및 하부 지지부의 평가는 101.보다 상세한 유한요소모델을 사용하여야 한다.

2. 강도 기준

리퀴드 돔 커버 및 하부 지지부의 강도는 다음 식을 만족하여야 한다.

$$\sigma_e \leq \mu \sigma_y$$

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_X^2 - \sigma_X \sigma_Y + \sigma_Y^2 + 3\tau^2}$$

σ_X : x방향의 응력(유한요소해석으로부터 얻어진 값) (N/mm²)

σ_Y : y방향의 응력(유한요소해석으로부터 얻어진 값) (N/mm²)

τ : 전단응력(유한요소해석으로부터 얻어진 값) (N/mm²)

σ_y : 170 (N/mm²)

μ : 안전 계수로 1.0 ↓

인 쇄 2017년 3월 24일

발 행 2017년 4월 1일

액화천연가스 운반선 펌프타워 구조강도평가 지침

발행인 이 정 기

발행처 한 국 선 급

부산광역시 강서구 명지오션시티 9로 36

전화 : 070-8799-7114

FAX : 070-8799-8999

Website : <http://www.krs.co.kr>

신고번호 : 제 2014-000001호 (93. 12. 01)

Copyright© 2017 **KR**

이 지침의 일부 또는 전부를 무단전제 및 재배포시 법적
제재를 받을 수 있습니다.