

충전탑의 구조설계

(1)

■ 본연합회 발행 「폐가스흡수처리」

1. 재료

1-1 재료의 선정

충전탑은 구조물로서의 필요한 내압 및 여러가지 외적인 힘이 견딜 수 있도록 충분한 기계적 강도를 갖는 것이어야 한다. 그리고 취급하는 유체(流體)에 따라 재료를 현저하게 부식시키고 또 강도를 저하시키는 경우가 있는데, 이러한 경향은 온도가 올라갈수록 강하게 된다. 따라서 탑의 재질 선정에서는 이들의 사용조건에 대하여 충분한 저항성이 있는 것, 즉 재료의 기계적·물리적 성질, 내부식성 및 재료의 가공성, 경제성에 이르기까지 검토하여야만 한다.

탑의 재료로 일반적으로 사용하고 있는 것은 다음과 같다.

ⅰ) 철강재료-일반 구조용 강재, Boiler용 강재, 니켈강, 크롬몰리브덴강, 스테인레스강 또는 라이닝한 강재.

ⅱ) 비철재료-티타늄, 알루미늄 및 알루미늄 합금, 동 및 동합금.

ⅲ) 비금속재료-Glass lining, Carbon, 자기 및 고무 또는 합성수지의 lining.

1-2 재료의 부식

재료의 부식기구는 대단히 복잡하지만 일반적으로 전기화학적 작

용에 의해 금속의 결정격자가 흩어져 금속의 화합물로 변화하는 것을 말한다. 그러나 이것도 액체 또는 기체의 종류, 온도, 압력, 농도, 흐름의 상태, 액체 또는 기체 속에 혼입되어 있는 물질 등에 의해 뚜렷이 다르게 된다. 또한 구조물에 외적 힘에 의한 응력, 용접 가공에서 생기는 잔류응력, 열응력 등에 의해서도 부식은 일어난다.

표 1은 내식 목적으로 사용되는 실용재료를 제시한다.

부식으로 잘 일어나는 문제로서 응력으로 인한 부식으로 갈라지는 문제가 있다. 이 부식기구에 관해서는 아직 분명치 않은 점이 많지만, 응력을 받고 있는 재료가 어느 특정의 부식 상황에 놓여질 경우에 일어나기 쉽다.

재료가 전체면에 이르러 부식되는 것 같은 곳에서는 갈라지는 일이 없지만, 어떤 특정한 부식 환경에 놓이면 응력으로 인한 부식으로 갈라지는 것을 가끔 볼 수 있다. 예를 들면 오스테나이트(Austenite)계 스테인레스에서는 산성 염화물로서 갈라지기 쉽고, Al 합금은 NaCl 용액에서 분해되기 쉽다.

응력으로 인한 부식으로 분해되는 것을 방지하기 위해서는 외적 힘에 의한 응력 또는 잔류응력을 제거하거나, 부식환경을 개선하

든가 또는 그 부식환경에서 분해가 일어나지 않는 재료를 선택하는 방법 중 어느 하나를 택한다. 또한 종류가 다른 금속의 접촉에 의한 부식도 흔히 문제가 되는 점이다. 이것은 전해질을 포함하는 수용액 중에 다른 금속이 서로 접촉하고 있으면 각 금속에는 전위열(電位列)이 있어 ion화 경향에 차이가 있으므로 기전력이 생기고 양극쪽의 금속이 국부적으로 부식되는 것이다. 다른 종류의 금속을 조합하여 제작하는 경우에는 각각의 재료간의 전위열을 충분히 검토해야 한다.

2. 하중과 허용응력

2-1 하중의 종류

탑은 그 하중 지지형태로 보면 탑 자체의 강도로 견디는 자립탑(self-supporting tower)과 guy wire 또는 stage beam으로 횡방향 하중을 지지하는 탑의 2종류가 있다. Stage beam으로 지지하면 풍압력 또는 지진력에 대한 탑을 지지하는 구조물이 커져서 설비비가 많이 드는 단점이 있어, 미관상, 안전상의 관점에서 최근에는 자립탑으로 하는 것이 선호되고 있다.

탑에 작용하는 하중으로서 그 방향에 따라 수직하중과 수평하중으로 구분된다. 수직하중으로서

표 1 내식재료

구분	분류	명칭	화학조성(%)
철강	Cr-Mo 저합금강	1Cr1/2Mo강	C<0.15, Cr 0.8~1.25, Mo 0.4~0.65
		5Cr1/2Mo강	C<0.15, Cr 4~6, Mo 0.45~0.65
	Martensite계 stainless강	13Chrome, SUS 21	C 0.12~0.18, Cr 11.5, Si<0.6, Mn<0.1
		AISI 410	C 0.25~0.4, Cr 12~14, Si<0.75, Mn<0.1
		SUS 23	
		AISI 420	
	Ferrite계 Stainless강	18Chrome, SUS 24	C<0.12, Cr 16~18, Si<0.75, Mn<0.1
		AISI 430	
	Austenite계 Stainless강	18-8계, SUS 27, 28, AISI 304	C<0.08, Cr 18~20, Ni 8~11
		18-8-2 Mo, SUS 32, AISI 316	C>0.08, Cr 17~19, Ni 10~14, Mo 1.75~2.75
18-8-Cb, SUS 43, AISI 347		C<0.08, Cr 17~20, Ni 9~13, Cb+Ta 10×C%	
18-8-Ti, SUS 29, AISI 321		C<0.08, Cr 17~20, Ni 9~13, Ti 5×C%	
22-12, SUS 41, AISI 309s		C<0.08 Cr 22~24, Ni 12~15	
25-20, SUS 42, AISI 310s		C<0.08, Cr 24~26, Ni 19~22	
20합금	카펜더 20	C<0.07, Cr 20.0, Ni 290, Cu>30, Mo>20	
고규소 주철	후리론, 베시론	Si 14~18, Mn 0.25~0.5, C 0.2~0.8	
고니켈 주철	니레지스트 1	Ni 13.5~17.5, Cu 5.5~7.5, G 1.8~2.5, Mn 1~1.5, Si 1~2.5	
알루미늄합금	순수알루미늄	Aluminum	Al 97~98, Mn 1~1.5, Cu 0.5, Si 0.6, Fe 0.2
	Al-Mg합금	35, 3003, A ₂ P ₃	Al 94~95, Mg 4.7~5.7
	Al-Mg합금	56s, 5056, A ₂ P ₂	Al 94~95, Mg 4.7~5.7
	Al-Si합금	43s, 시루민 13합금	Al 88~94, Si 5~12
구리합금	순수구	전해동, 탈산동	Cu>99.5
	Cu-Zn-Sn합금	네발브라스(NBsP)	Cu 59~64, Sn 0.5~1.9, Zn Rem
		아드미랄티 브라스	Cu 71, Sn Zn 28
	Cu-Zn-Al합금	Alumi-Brass(BsTF3)	Cu 76~79, Al 1.8~2.5, As 0.03~0.10
		알브락(BsTF2)	Cr 0.01~0.10, Mn 0.2, Zn Rem Cu 76~79, Al 1.8~25, As 0.02~0.08, Si 0.2~0.5, Sb 0.2~0.01~0.08, Zn Rem
	Cu-Al합금	암스브론즈(ABP)	Cu Rem, Al 7~10, Fe 2~4, Ni 0.5~2.0, Mn 0.5~2.0
Cu-Ni합금	10%큐프로닉켈	Cu Rem, Ni 9~11, Fe 0.5~2.0, Mn<1.0	
니켈합금	순수 Nickel	닉켈	Ni>99.9
	Ni-Cu합금	monel	Ni 67, Cu 30, Fe 1.5, Mn 1.0, Si 0.1, C<0.15
	Ni-Cr-Fe합금	인코넬	Ni 76, Cr 15.5, Fe 7.5, Cu 0.2, C 0.08
	Ni-Mo-Cr합금	하스티로이 C	Ni 58, Cr 16.5, Mo 17, Fe 5, W 4.5
Ni-Si합금	하스티로이 D	Ni 88, Si 9, Cu 3	
기타	Titanium	Titanium	Ti 99.5~99.9
	Tantalum	Tantalum	Ta

유체 및 내압에 의한 인장 또는 적설하중 등이 고려된다. 이것은 어느것이나 장기하중(long term load)이다. 한편 수평하중으로서는 풍압력 및 지진력이 있고, 이것들은 단기하중(short term load)으로서 고려된다. 폭풍우(강풍)와 지진이 동시에 발생하는 것은 우선 생각할 수 없으며 더욱이 이것들의 힘이 동일방향으로 작용할 가능성은 적으므로 풍압과 지진력에 대해서는 따로따로 계산하고 어느 쪽이든 큰 값으로 설계를 진행하는 것이 보통이다.

2-2 풍압력

태풍의 통로로 되어 있는 지역이나 태풍지대를 가진 나라 등에서는 옥외설치의 자립탑은 끊임없이 강풍의 작용을 받고 있는 것이다. 풍압력을 받는 탑은 기초를 고정점으로 한 외팔보(cantilever)로 볼 수 있다.

풍압력은 탑의 높이에 따라 차이가 있고 높을수록 풍압력이 크게 된다. 이것은 지면과의 마찰에 의한 것이며 일본건축학회에서는 시·군·구에서 풍압력의 적용을 정할 수 있도록 되어 있지만 다음과 같이 정하는 것이 일반적이다.

$$q = 60\sqrt{h} \quad (1)$$

$$f = c \times q = 60c\sqrt{h} \quad (2)$$

여기서 q는 바람의 속도에 의해 정해지는 양, 즉 속도압, f는 풍압력을 표시한다. 또 h는 기초면에서부터의 높이, c는 풍압계수이고 구조물의 형상에 의해 정하며 통상 탑과 같이 원형 단면적인 경우는 0.7을 인용한다. platform이나 ladder 등 부속품이 부착되어 있는 경우는 0.85로 한다.

(1)식에서 q를 구하는 데는, h₁

는 탑의 자중, 보온재, platform, ladder, 배관, 탑 충전물, 운전시의 환경관리인. 1994. 7

표 2 속도압의 산출

h ₁ (m)	h ₂ (m)																
	2	4	5	6	7	8	9	10	12	15	18	20	25	30	35	40	45
0	(100)	(100)	(100)	(100)	110	120											
2		110	120	120	130	140	140										
4			130	140	150	150	160	160									
5				150	150	160	160	170									
6					160	160	170	180	180								
7						170	170	180	190	200							
8							180	180	190	210							
9								190	200	210	220						
10									200	220	230	240					
12										230	240	240	260				
15											250	260	270	290			
18												270	280	300	305		
20													290	300	310	320	
25														320	330	340	350
30																370	380
35																	380
40																	390

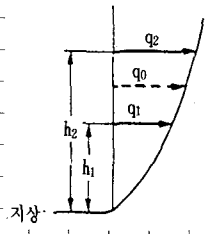


표 3 속도압의 산출

h _m v [m/s]	16m까지	16m이상 20m이하	20m이상 25m이하	25m이상 31.5m까지	31.5m이상 40m까지	40m이상 50m이하	50m이상 63m이하	63m이상 80m이하
16	17	17.5	18.5	19.5	20.7	22	23.2	24.7
50	167	721	181	191	202	215	227	241
60	240	247	262	269	293	312	329	350

인 경우의 q₁, h₂인 경우의 q₂의 평균치 q₀ = $\frac{q_1 + q_2}{2}$ 를 택하는 것이 합리적이다. 표 2에 의하면 편리하다.

한편 (1)식 대신에 풍속에 의한 변화도 고려할 때는 다음 식에 의할 수도 있다.

$$q = \frac{v^2}{30} \sqrt{h} \quad (3)$$

단, h ≤ 16m에서는 h = 16m로 한다. v는 풍속을 표시한다. 표 3에 의해 h_m, v를 사용해서 q를 구하는 것이 실제적이다.

2-3 지진력

지진이 발생했을 경우, 탑의 설계에서 중요한 것은 그 수평력에 대한 강도이다. 이것에는 적당한 지진에 의한 수평진동을 예정하여 이른바 설계진도 K를 결정한다. 일본의 건축규정에서는 건축물에서 독립되든가 옥상에서 돌출해 있는 탑 등에 대해서는 K=0.3을 인용하고 있다.

미국에서는 탑의 고유 진동주기와 설계 진도(震度: 지진계수)의 관계를 그림 1과 같이 규정하고 있다. 또 표 4는 과거에 일어난 대형 지진의 기록을 제시한다.

2-4 허용응력

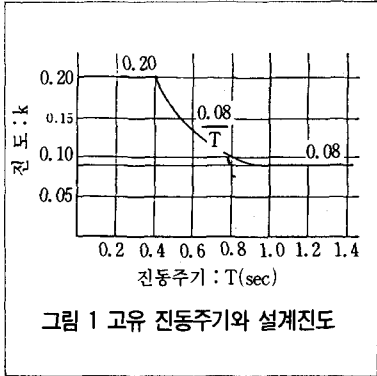


그림 1 고유 진동주기와 설계진도

표 4 과거의 대형 지진

장 소	연 월	주기 T(sec)	k = $\frac{v}{g}$
일 본	1894년 6월	1.3	0.09
San Francisco	1906년 4월	2.0	0.25
동 경	1923년 9월	1.35	0.10
Long Beach	1933년 3월	0.30	0.23
		1.50	0.11
		1.80	0.02
Helena	1935년 10월	0.13	0.13
		0.3	
		1.0	

재료의 허용응력이란 그것이 실제에 적용되어 안전하다고 생각되는 최대응력을 말하고, 재료의 인장 강도에 안전율을 곱한 것이지만 재질, 하중의 성질, 운전온도에 따라 다르다. 보일러 및 압력용기 안전규칙의 압력용기 구조규격에서는 장기하중에 대해 허용응력을 다음과 같이 정하고 있다.

i) 재료의 항복점(yield point)이 인장강도의 70% 미만인 것에 대해서

$$\sigma_a \leq \frac{1}{4} \sigma_u \text{ (강재인 경우)}$$

$$\sigma_a \leq \frac{1}{6} \sigma_u \text{ (주강인 경우)}$$

ii) 재료의 yield point가 인장강도의 70% 이상인 것에 대해

$$\sigma_a \leq \frac{1}{2.5} \sigma_y$$

단, σ_a =허용응력
 σ_u =인장강도
 σ_y =yield point

한편 단기 하중에 대해서 일본 건축기준에 의하면 허용응력을 yield point까지 적용해도 된다고 하지만, 탑은 단순한 구조물과는 달라 내부에 압력을 갖고 또한 위험 유체를 포함하는 경우가 많아 한층 안정성이 요구된다. 따라서 다음의 값을 취할 수 있다.

$$\sigma_a = (0.5 \sim 0.8) \sigma_y$$

압축 및 전단에 대해서는 압력 용기 구조 규격에 의하면 강재의 압축강도는 인장강도와 같고, 전단강도는 인장강도의 85%라 보면 된다.

3. 탑 본체의 강도설계

3-1 판 두께의 계산조작

계산조작은 시행착오법(trial & error)으로서 다음 순서로 행한다.

① 먼저 내압(또는 외압)에 의한 판 두께를 계산하여, 최소의 판 두께를 구하고 이것에 적당한 여유 두께를 더한다.

② 다음에 부가하중(附加荷重)에 의한 합성응력을 계산하여 그 값의 과부족을 검토하고 만약 허용응력에 대해 과부족이 있으면 여유 판 두께의 양을 가감한다.

③ 다시 한번 응력을 재점검하여 이것을 반복하여 적당한 여유 두께를 구한다.

④ 여기에 얻어진 값이 적절한 부식부분을 부가하여 시판 치수의 판 두께를 결정한다.

환경관리인, 1994. 7

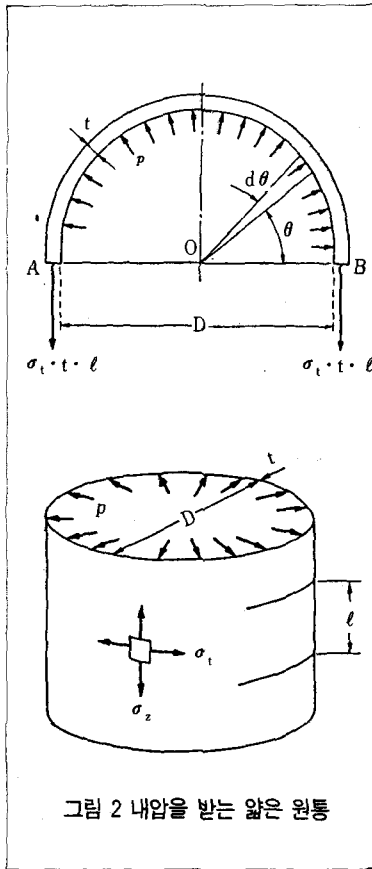


그림 2 내압을 받는 얇은 원통

3-2 탑의 조작압에 의한 응력

(i) 내압의 경우

내압은 장기하중이고 이것으로 인해 생기는 응력은 탑의 전장, 즉 전체 길이(skirt는 제외)에 이르러 동일한 크기이다.

여기서 대상으로 하는 탑의 종류는 박판원통(박판원통이란 ASME에서는 $D \geq 4t$, API에서는 $D \geq 10t$ 이라 정의되어 있다)이라 생각해도 되므로 shell의 반경방향의 응력은 무시할 수 있다.

원주 방향의 인장응력 σ_t 는

$$\sigma_t = \frac{PD}{2t} \quad (4)$$

축 방향의 인장응력 σ_z 는

$$\sigma_z = \frac{PD}{4t} \quad (5)$$

단, P=내압(kg/cm²)
D=shell 내경(cm)
t=shell판 두께(cm)

압력용기 구조 규격에서는 원주 방향의 인장응력만을 고려하여 최소 판 두께를 다음 식에 의해 산출하는 것을 규정하고 있다(단, $D \geq 4t$ 일 때).

$$t = \frac{PD}{200 \sigma_x \eta - 1.2P} + c \quad (6)$$

단, P=최대 사용압력(kg/cm²)
D=shell의 부식부분을 제한 내경(cm)
 σ_x =허용응력(kg/cm²)
 η =용접효율
c=부식 두께(mm)

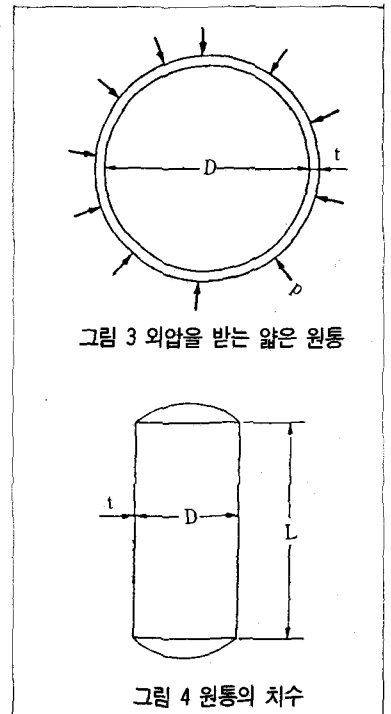


그림 3 외압을 받는 얇은 원통

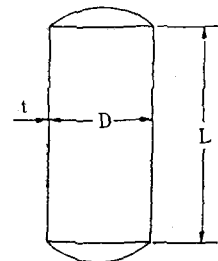


그림 4 원통의 치수

t =최소 판 두께(mm)
 ii) 외압의 경우(조각압이 전 공인 경우)
 응력의 부호를 인장일 때 정(正), 압축일 때 부(負)라 하면
 원주 방향의 압축응력 $-\sigma_t$ 는

$$-\sigma_t = \frac{PD}{2t} \quad (7)$$

축 방향의 압축응력 $-\sigma_z$ 는

$$-\sigma_z = \frac{PD}{4t} \quad (8)$$

이 압축응력 $-\sigma_t, -\sigma_z$ 의 압박판원통의 강도상으로 보면 단독으로서는 그리 중요하지 않고 합성응력을 구할 때 필요로 한다. 이 경우 오히려 외압에 의한

Buckling 및 Collapse가 문제이고, 탄성 안정상의 면에서 별도로 안전판 두께를 정할 필요가 있다.

간단하게 구하기 위해 그림 5를 적용하면 된다. 즉 shell의 길이를 L , 외경을 D_0 , 판 두께를 t 라 하고 $L/D_0, D_0/t$, 조작온도에서 factor B 를 구한다.

다음에 $P = \frac{CB(t-\sigma)}{D_0}$ 를 계산하여 이 압력이 최고 사용압력보다 크고 또한 필요에 충분히 안전하게 trial & error로 t 를 구한다. 여기서 C 는 정수이고 표 5에 의한다.

표 5 C의 값

적사각형 조인트의 종류	C
Seamless 또는 Butt형의 적사각형 조인트	1.0
중첩형의 적사각형 조인트	0.5

외압을 받는 shell은 shell의 바깥에 일정간격의 보강 Ring(Reinforcement Ring)을 부착하고 shell 판 두께를 얇게 하는 방법을 택할 때가 있다.

또 판 두께가 다음 식에서 산정되는 최소 두께 미만인 shell에는 변형방지를 위해 보강 링을 붙여야 한다. 자중 및 내용물에 의해 변형할 염려가 있는 shell에 대해서도 같이 고려해야 한다.

$$t = 0.001D + 2.5 \quad (9)$$

보강 Ring 치수는 그림 5에서 결정한다. 보강 Ring의 pitch를 ℓ 라 하고 다음 식에 의해 B 의 값을 구한다.

$$B = \frac{PD_0}{t + \frac{a}{\ell}} \quad (10)$$

단, a =보강 Ring의 단면적
 이 B 의 값을 구하면 그림 5에서 A 를 구한다. 따라서 보강 Ring에 필요한 단면 관성 모멘트는 다음

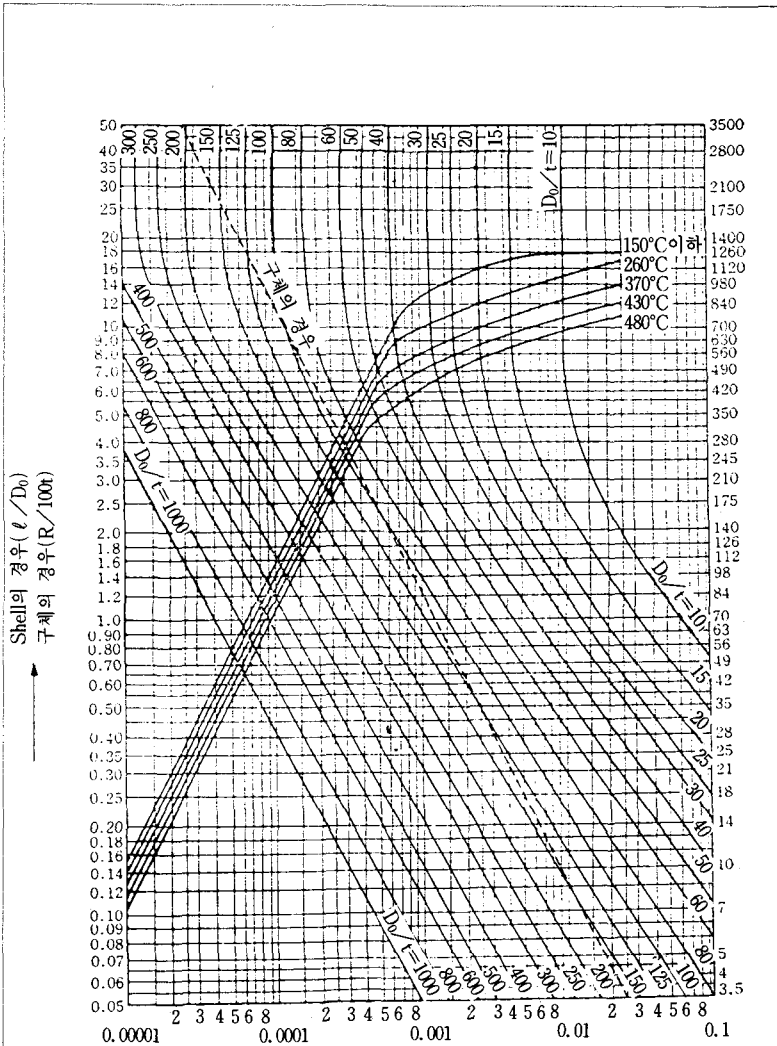


그림 5 탄소강(항복점 21kg/mm²이상 27kg/mm²미만)

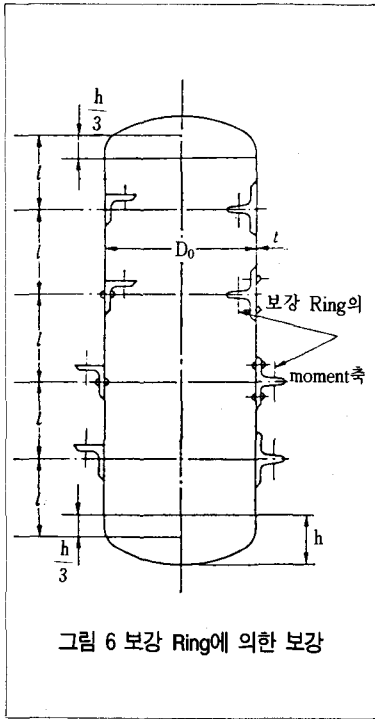


그림 6 보강 Ring에 의한 보강

식으로써 얻어진다.

$$I_s = \frac{D_0^2 \ell (t + \frac{a}{14}) A}{14} \quad (11)$$

여기서 I_s = 보강 Ring의 관성 moment(mm⁴)

보강 링 단면의 중심점을 통과하고 shell의 중심선에 평행한 축에 관한 것.

실제의 보강 링의 관성 모멘트를 I_a 라 할 때 이 I_s 를 $I_a \geq I_s$ 로 되도록 보강 링을 선정하면 된다.

3-3 탑의 자중에 의한 응력

탑의 자중 및 부대물(condenser, 배관, 충전물, 보온재, 유체등)에 의해 탑은 압축을 받는다. 이것은 장기 하중이고, 탑정으로부터 아래로 내려옴에 따라 증가한다.

탑정으로부터 x의 거리인 위치에서 shell판 중의 자중에 의해 생기는 압축응력 $-\sigma_w$ 는

환경관리인. 1994. 7

$$-\sigma_w = \frac{W + W_p + W_c + W_L + \dots}{\pi dt} \quad (12)$$

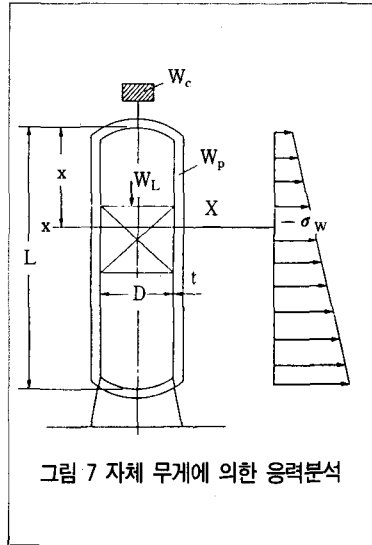


그림 7 자체 무게에 의한 응력분석

여기서

W = 탑정으로부터 x까지의 탑의 자중

W_p = 탑정으로부터 x까지의 보온재 중량

W_c = 탑정으로부터 x까지의 condenser, 배관 등의 중량.

W_L = 탑정으로부터 x까지의 충전물, 유체의 중량

이 밖에 탑정에 쌓인 눈이 일어날 수 있는 경우에는 이것에 의한 하중을 (12)식에 더해 주어져야 한다. 또 강판의 강도계산에서도 외압 하중으로서 고려할 필요가 있다.

단, 선의 하중에 비해 아주 적은 경우는 무시해도 된다.

수평면 1m²당 적설하중은 눈이 많은 지역.....적설량 1cm 당 3kg

기타 지역.....적설량 1cm 당

2kg

을 표준으로 하지만 위의 어느 것에 의하든가 또 적설량을 몇 cm로 하는가는 설치현장의 여건 등에 따르면 된다.

4 Bending-Moment에 의한 응력

Condenser, 배관, ladder, platform 등의 부속물이 편심 하중으로서 탑에 작용할 경우 그 bending-moment에 의해 bending 응력이 생긴다. 이것은 장기 하중이고 탑 전체 길이에 이르도록 일정하다.

Shell 중심축에 관한 bending-moment는

$$M = W_c \ell$$

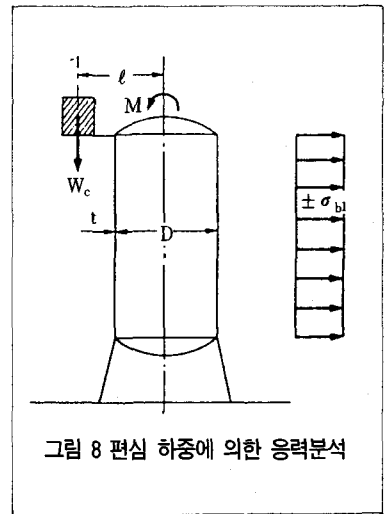


그림 8 편심 하중에 의한 응력분석

Bending 응력 $\pm \sigma_{bi}$ 은

$$\pm \sigma_{bi} = \frac{M}{Z} = \frac{4W_c \ell}{\pi D^2 t} \quad (13)$$

여기서

W_c = 편심 하중(kg)

ℓ = Arm의 길이(cm)

z = shell 중심축에 관한

$$\text{단면계수} = \frac{\pi}{4} D^2 t \text{ (cm}^3\text{)}$$

(다음호에 계속)