

Chimney(굴뚝)設計 概要(2)

An Introduction to chimney Engineering

現代엔지니어링(株) 次長 金 錫 求*
代理 金 光 浩

6. 地震의 影響

地震이란 自然的 爆發이나 人工的 發破, 火山活動, 斷層作用, 隕石의 衝擊 등으로 인한 地殼의 갑작스런 變位에 의해 發生하는 地殼內의 彈性波의 傳播로 인하여 派生되는 地盤震動을 말한다.

地震波는 3가지 類型的의 彈性波인데 제일 빠르게 傳播되는 P波(primary, longitudinal, compressional, Dilatational wave)는 固體나 液體 모두 通過할 수 있다. 地震波의 進行 方向에 直角으로 運動하는 S波(Secondary, transverse, shear, equivoluminal wave)는 液體部分을 通過할 수 없다. 地表에서 나타나는 地面波(Surface wave)는 地面과 平行한 水平面에서 左右로 進行方向에 垂直으로 振動하는 L波(Love wave)와 波動的 進行方向을 따라 水平 및 垂直으로 形成된 R波(Rayleigh wave)로 區別된다.

Chimney에 이러한 地震波가 加해 졌을 때의 影響을 考慮하기 위해선 地震을 構造工學的인 地動強度와 그 動的特性, 持續時間 등으로 파악되어야 한다. 地動強度는 地盤의 最大加速度로서, 지진의 動的 特性은 Response Spectra로서 사용하기도 한다.

耐震解析 方法은 靜的 解析法과 動的解析法이 있는데 대부분의 굴뚝에서는 그 고유진동수가 33cps 이하에 해당하므로 動的解析法을 채택해

야 한다. 動的解析法은 Time History法과 Response Spectra, Power Spectral Density法 등이 있는데 이들을 간략히 소개하겠다.

地震入力에 의한 연돌의 動的學動은

$$y_n(t) = \frac{R_n}{M_n \omega_n} \int_0^t \mu g(\tau) e^{-\lambda_n \omega_n (t-\tau)} \sin \omega_n (t-\tau) d\tau \quad (6-1)$$

이다. 여기에서

$Y_n(t)$ = 진동 n 차 mode의 反應

R_n = n 차 mode의 participation factor

= $\sum i M_i \phi_{in}$

M_i = 위치 i 에서의 質量

ϕ_{in} = n 차 mode의 위치 i 에서의 變位

M_n = generalized Mass = $\sum i M_i \phi_{in}^2$

$\mu g(\tau)$ = 地震加速度 history

λ_n = critical Damping ratio

기차 耐震設計에 대한 고려사항으로는 stress-strain의 nonlinear, 地震入力들의 조합, Damping, modal combination 등 너무 많아 여기에서는 생략한다.

動的耐震設計의 重要 要素 중의 하나인 Chimney의 固有週期(f_1)算定式으로는 ACI 307에서는

$$T = \frac{1.8H^2}{3(D_1 - D)\sqrt{E}} \sqrt{\frac{w_1}{w}} \quad (6-2)$$

을 提示하였고 Chu, Kuang-Han과 J. Park는 ASCE Nov. 1973에서

* 건축기술사(구조)

$$f_i = \frac{1}{T} = \frac{3.52}{42} \cdot \frac{De}{H^2} \sqrt{\frac{Lg}{2w}} \quad (6-3)$$

를 추천하고 있다.

여기에서

H =chimney 높이

D_1, D, De =chimney의 하단, 상단, 유효직경

w_1, w, w_s =chimney의 총중량, shell 중량, shell의 단위 중량.

E =구조재료의 탄성계수

g =중력 가속도

Misurata power chimney의 경우 ACI 방법으로는 $f_i=0.95\text{cps}$ 였고 ASCE 방법으로는 $f_i=1.046\text{cps}$ 이었으나 좀더 정확하고 경제적인 설계를 위하여 computer Analysis로 얻은 $f_i=0.912\text{cps}$ 값을 채택하였다.

7. 溫度的 影響

最近의 RC 조 Chimney들은 Concrete shell과 Lining 사이에 빈공간이 設置되고 있다. 이 공간들은 Chimney 下段의 開口部로부터 Chimney 頂部의 開口部로 空氣에 의해 환기됨으로써 Concrete shell에 對하여 高溫의 排 Gas에 의한 熱영향을 극소화 시켜준다. Chimney에 있어서 Heat Transmission 計算의 目的은 高溫 排 Gas의 熱영향에 의해 Structural Shell에 發生되는 熱應力에 對한 安全을 검토하기 위해서이며 Steel chimney의 경우에는 外部 Painting의 耐熱能力을 검토할 수 있다. 또한 作業者の 活動에 지장을 줄 수 있으므로 Thermal Insulation의 選擇은 신중을 기하여야 한다.

(1) Shell 층을 통하여 흐르는 Heat Flow

Chimney에서 高溫排 Gas로부터의 熱흐름(Heat Flow)을 Flue Duct에서 Insulation을 거쳐 Insulation과 Concrete Shell 사이의 空氣에 의해 환기되는 빈공간과 Shell을 통하여 外部 大氣로 빠져 나간다.

Linings(Flue Duct와 Insulation)을 통하여 흐르는 Heat Flow

$$q_l = K_l(T_g - T_v) \quad (7-1)$$

여기에서, T_g : 排 Gas의 溫度

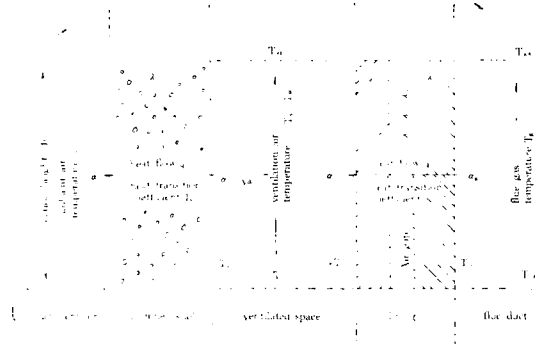


그림 7-1 Chimney의 熱貫流圖

T_v : Ventilation 空氣溫度

K_l : Linings의 Heat Transition 係數

$$K_l = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_s d_1} + \sum \frac{1}{2\lambda_j} \ln \left(\frac{d_{j+1}}{d_j} \right) + \frac{1}{\alpha_{vi} d_{i0}}} \quad (7-2)$$

Concrete Shell을 통하여 흐르는 Heat Flow

$$q_c = K_c(T_a - T_v) \quad (7-3)$$

여기에서, T_a : 大氣溫度

T_v : Ventilation 空氣溫度

K_c : Concrete shell의 Heat Transition 係數

$$K_c = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{va} d_i} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \left(\frac{d_0}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_a d_0}} \quad (7-4)$$

여기에서, λ_c : Concre Thermal Conductivity

α_a : Shell 바깥 부분에서의 Heat Transmission 係數

α_{va} : Shell 안쪽면에서의

d_0 : Shell 外徑

d_i : Shell 內徑

以上으로부터 Shell 各層의 表面溫度를 求하면 다음과 같다.

$$T_{li} = T_g - \frac{q_l}{\alpha_s} \quad (7-5)$$

$$T_{lo} = T_v - \frac{q_l}{\alpha_{vi}} \quad (7-6)$$

$$T_{ci} = T_v - \frac{q_c}{\alpha_{va}} \quad (7-7)$$

$$T_{c_o} = T_a + \frac{qc}{\alpha_a} \quad (7-8)$$

여기에서, T_{ii} : Lining 内部表面溫度

T_{i_o} : Lining 外部表面溫度

T_{ci} : Concrete Shell 内部的 表面溫度

T_{c_o} : Concrete Shell 外部的 表面溫度

(2) 太陽의 影響

햇빛이 Chimney의 한쪽면을 비출때 반대편은 그늘지게 되며 이런 상황이 계속됨으로 해서 햇빛 받는쪽과 그늘진 쪽은 상당한 溫度差가 나타난다. 이렇게 發生된 溫度差는 Chimney Shell의 원주방향과 수직방향에 變形을 일으키게 된다. 이런 變形은 Chimney를 그늘진곳 쪽으로 휘게한다. 一般的으로 Sun Effect로 생기는 deflection은 風力이나 地震力에 의해 發生되는 deflection보다 적다. 그러나 Boiler를 정오쯤 급작스럽게 가동함으로 기인되는 熱應力과 습해질 경우 Chimney에 큰 영향을 주게 된다. 그러므로 Boiler의 가동시간은 낮시간을 피하고 야침 일찍이나 저녁늦게 정하는 것이 바람직하다.

여기에서, O_T : 頂部の 外徑

D_B : T段의 外徑

H : Chimney의 높이

T : 경사율 = $(D_B - D_T)/H$

C : Sunny side와 shaded side 사이의 溫度差

S : 頂部에서 수평처짐 길이

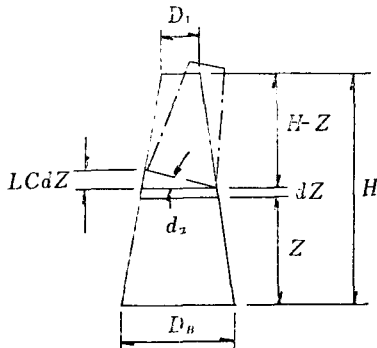


그림 7-2 Sun effects-top deflection

그러면,

$$d\alpha = \frac{LCdZ}{D} \quad D = D_B - TZ \quad (7-9)$$

$$S = \int_0^H d\alpha(H-Z) = \int_0^H \frac{LC(H-Z)dZ}{D_B - TZ} \quad (710)$$

$$= \frac{LC}{T} \left[H + \frac{D_T}{T} \ln \left(\frac{D_T}{D_B} \right) \right] \quad (7-11)$$

頂部에서의 수평처짐 길이는 式(7-11)을 使用하여 求한다.

8. 腐蝕에 대한 考慮

Chimney에 腐蝕을 초래하는 原因은 燃燒가스와 環境의 影響인데 이 중에서 排出가스의 높은 속도와 使用燃料가 含有하는 硫黃成分, 낮은 가스 排出溫度로 惹起되는 結露, Chimney의 높이가 높아짐에 따라 가스가 排出되기 전에 熱損失로 인한 溫度下落은 腐蝕의 커다란 原因이 된다.

낮은 溫度에서의 腐蝕은 150°C以下에서 일어나는 것을 말하는데 燃料의 硫黃成分에 起因한다. 나무나 숯을 제외하고는 硫黃成分이 없는 固體燃料은 없다. 硫黃은 燃燒하여 SO₂나 SO₃가 된다. 또 이들은 상호



가 되나 溫度와 개개의 成分集中에 左右된다. 낮은 溫度에서는 左에서 右로 높은 溫度에서는 右에서 左로 변한다. 이때의 反應常數 Kp는

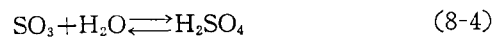
$$K_p = \frac{PSO_3^2 \times PO_2}{PSO_2^2} \quad (8-2)$$

여기에서 PSO₃, PSO₂, PO₂는 SO₃, SO₂, O₂의 Partial Pressure이다. Bodenstern과 Pöhl에 의하면

$$\log K_p = \frac{10,373}{T} + 1,222 \log T - 13,500 \quad (8-3)$$

으로 溫度(T)와 함수관계에 있음을 알 수 있다.

또한 SO₃는 黃酸이 되는데



$$K_P = \frac{PH_2SO_4}{PSO_3 \times PH_2O} \quad (8-5)$$

$$\log K_P = \frac{5000}{T} - 1.75 \log T + 0.00057 \times T - 300 \quad (8-6)$$

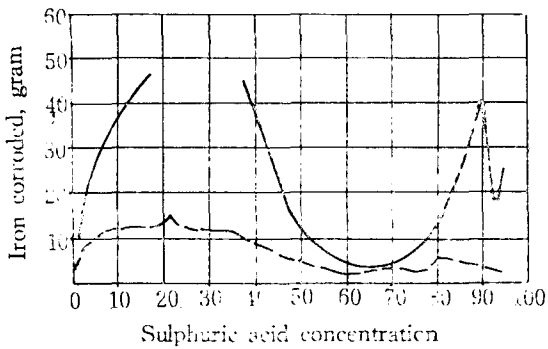


그림 8-1 Corrosion in boiling sulphuric acid. Duration of test 4 hours(34).
 — mild steel — cast iron

으로 溫度에 影響을 받는다.

Rylands 와 Jenkinson 은 그림 (8-1)와 같은 腐蝕에 대한 實驗結果를 내놓았다.

높은 온도에서의 腐蝕은 燃燒時 形成된 黃酸과 混合된 燃料재의 影響으로 생긴다.

기타 磨耗 등 考慮할 事項이 많으나 다음 기회로 미룬다.

9. 附屬品(Appurtenances)

(1) 航空障礙燈과 航空障礙標識

大型 plant에서의 chimney는 대개 60M 이상인 high rise 構造物이므로 航空機의 運行에 妨害를 줄 우려가 있다. 우리나라 航空法 第41條는 60M 以上の 構造物에 對한 航空障礙燈의 設置를 規定하고 있으며 主界各國 航空法에도 航空障礙燈의 設置를 規定하고 있는데 ICAO에서 채택하고 있는 設置方法을 우리나라 航空法이 많이 따르고 있으며 美國의 FAA(Federal Aviation Administration) Standard 內容도 거의 同一하다. ICAO Standard는 金井 Misurata 發電 및 담수 plant의 Chimney 設計에서도 적용되었는데 航空障礙燈은 그림 (9-1)과 같이 設置되며, 建物과 인접한 Chimney에 對하여는 그림 (9-2)과 같이 設置된다. 또한 Chimney의 정상에는 排 Gas로부터의 燈化기능의 손상을 방

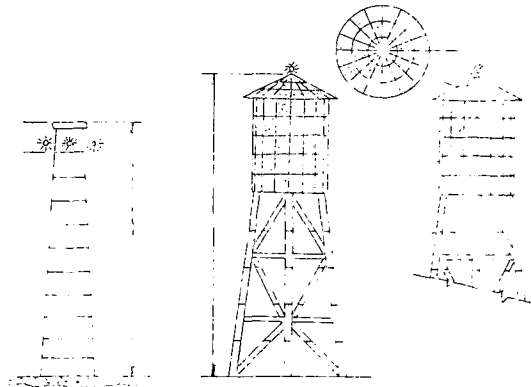


그림 9-1 航空障礙燈과 標識

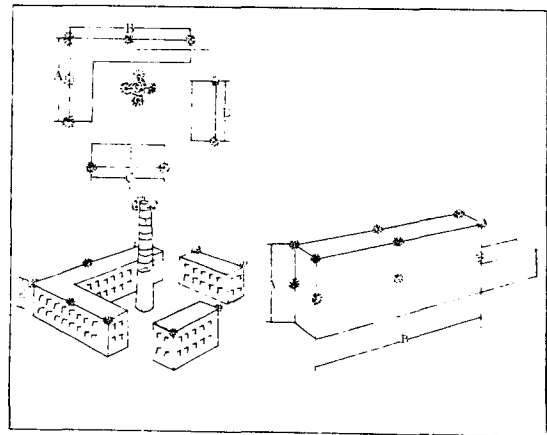


그림 9-2 인접 건물이 있을 때의 航空障礙燈

지하기 위하여 정상으로부터 하방 1.5m~3m 사이에 設置해야 한다.

航空障礙標識은 적색과 백색으로 表 (9-1)과 같이 도색한다.

表 9-1 航空障礙標識의 Band 폭

Longest dimension		Band width
Greater than	Not exceeding	
1.5m(5ft)	210m(700ft)	1/7 of longest dimension
210m(700ft)	270m(900ft)	1/9 "
270m(900ft)	330m(1,100ft)	1/11 "
330m(1,100ft)	390m(1,300ft)	1/13 "
390m(1,300ft)	450m(1,500ft)	1/15 "
450m(1,500ft)	510m(1,700ft)	1/17 "
510m(1,700ft)	570m(1,900ft)	1/19 "
570m(1,900ft)	630m(2,100ft)	1/21 "

(2) 避雷施設

Chimney 에 設置되는 避雷施設에 對하여 美國 防火協會의 피뢰규정(Lightning Protection Code NFPA No.78-1975) Section 24에 따르던 그림 (9-3)에서 보는 바와 같이 인하도선은 적어도 2 이상으로 Chimney 의 반대쪽에 各各 設置하여야 하며 160feet(약 48.8m)를 초과하는 높이에 對하여는 정상과 하단의 中間에 交叉연결(Cross Connection)되고 구리의 避雷針, 도

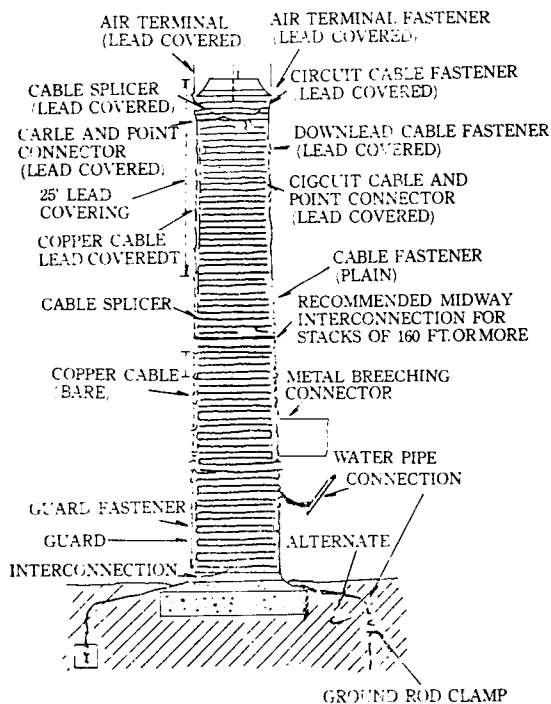


그림 9-3 避雷 System

선, Fastener 는 정상으로부터 25feet 까지는 적어도 1/16 inch 두께로 납被覆되며 또한 금속제 ladder 와 금속제 lining 은 그것의 윗쪽이나 아래쪽에서 避雷 System 에 연결되어져야 한다.

10. 施工方法

Chimney 의 施工은 주로 같은 형태의 일에 경험이 많은 專門業者들에 의하여 수행된다. 본 절에서는 Chimney 설계자가 施工性이 좋고 經濟的인 설계를 위해서 理解해야 될 內容만을 간략히 소개한다.

Chimney 의 施工方法은 그 形態와 材料에 따라 달라진다. 철근 콘크리트 Chimney 일때엔 Jump-Form 方法과 Slip-Form 方法이 있다.

Jump Form Method (그림 10-1)는 약 200m 높이까지의 연돌에 쓰이며 그 工事速度는 1주일 당 연돌 下部에서는 2.3m 정도이고 上部에서는 14m 가량 올라갈 수 있다. 밑부분에서 늦은 이유는 각종 開口部와 복잡한 配筋때문이다. Cobel 등은 Lift 되는 位置에 設置가 되도록 설계하면 별도의 멈춤이나 거푸집 조정 없이 施工할 수 있어 便利하다. 거푸집 材料는 대개 鐵板

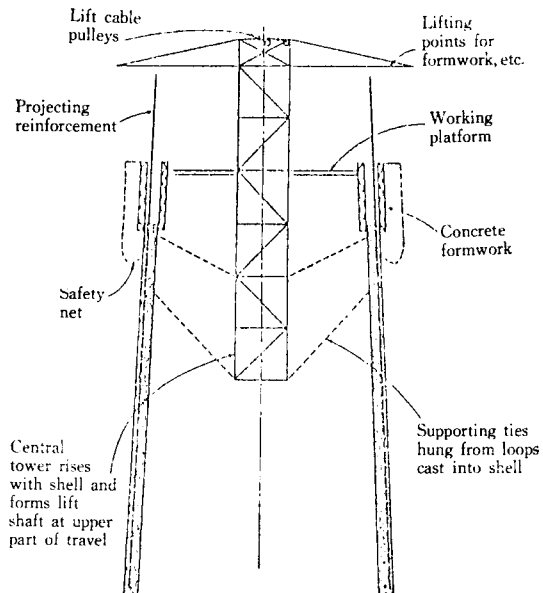


그림 10-1

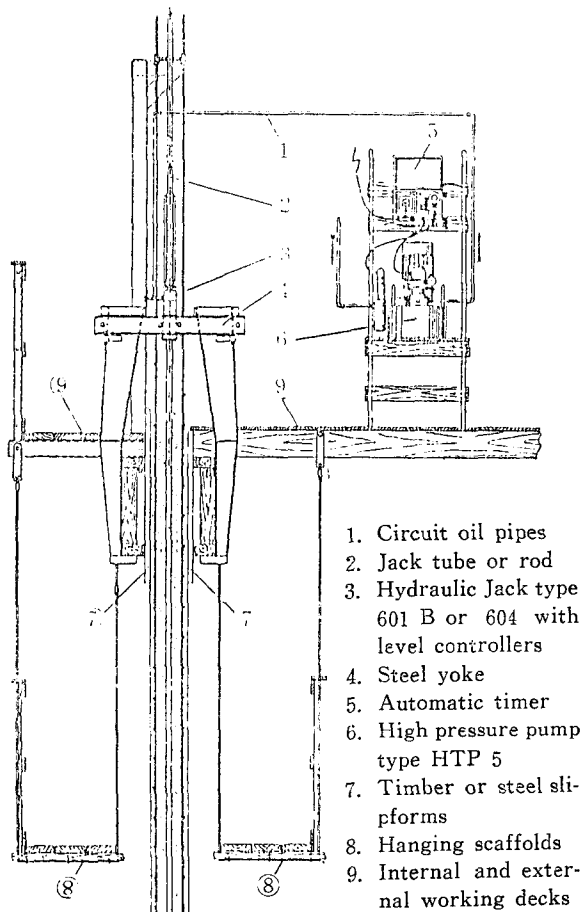


그림 10-2

으로 이루어지는데 서로 서로 겹쳐지게 되어 있어서 Chimney의 直徑이 줄어들면 하나의 panel이 제거될 때까지는 걸침량이 增大하게 된다. 거푸집 骨造는 Shell에 정착될 loop에 매달리고 이 골조 상부에서 Lift pullay와 Lifting gear가 거푸집을 引揚하게 된다. Lift는 사람용과 資材用으로 보통 2개가 설치되고 wire guide로 Chimney 下部에서 감아올린다.

Slipform Method(그림 10-2)는 200m 또는 그 이상의 Chimney 工事に 자주 쓰이는데 그 速度는 일주일 40m 정도로 웬만큼 높은 Chimney도 2달정도면 콘크리트 공사를 마무리 된다. 다만 초기 設置 및 마지막 撤去작업에 각각 2주일 정도가 추가 소요된다. Slip-Form은 30여개의 Jack에 의하여 引揚되어 mould 속에 계속적으로 콘크리트를 타설하게 된다. Chimney 直徑과 두께의 變形은 Sliding이 進行되는 동안

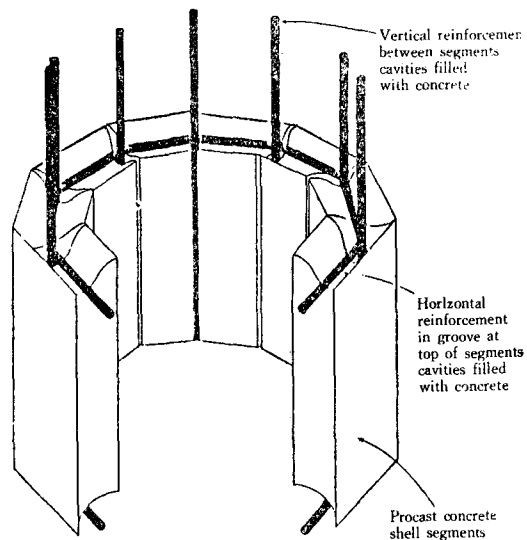


그림 10-3

Tripod 4-cylinder type

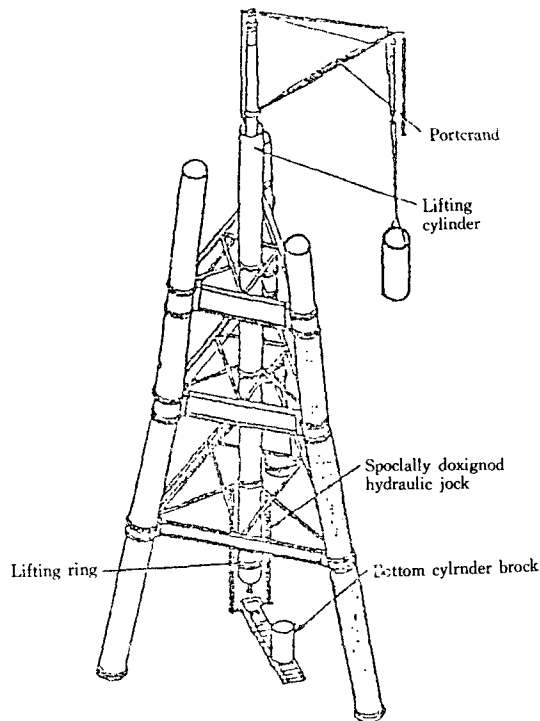


그림 10-4

에 Screw jack 으로 조정하게 된다.

Precast Concrete Chimney(그림 10-3)일 경우엔 그 構造形態나 製造規格에 따라 다르다. 製造 단위는 수직방향의 이음이 있게 할 때와 수평방향의 이음만 두는 경우가 있는데 어느 것이건 수직방향 主鐵筋은 現場에서 設置한다. 現場打設된 基礎 위에 Shift 가 건설되는데 낮은 Chimney 는 外部에 비계를 매어 공사하지만 높은 경우엔 移動式 作業台를 使用한다. 이 作業台는 Shell 에 실어둔 Socket 에 Shackle 볼트로 연결대로 고정하여 매어댄다. 대개 6개~8개 군데에서 매다는데 Shell 의 매 unit 가 설치되면 ratchet winch 도 引揚한다.

Steel Stack(그림 10-4)일 경우에도 構造形態에 따라 다르나 높은 경우엔 Jackup-Erection Method 와 Climbing Crane Method 를 採擇한다. 이들은 Stack 의 높이가 30~40m 를 넘게 되면 보통의 Truck Crane 이나 Crawler Crane, guide derick 등으로는 더 이상 到達할 수가 없

으므로 Stack 構造自體를 支持構造物로 하여 Crane 自身이 引揚되는 方法이다.

11. 結 言

Chimney Lining Shell, Appurtenance, Supporting Devices, 기초 등을 設計할 때 反映하여야 할 條件들을 簡略히 알아보았는데 이들 條件들은 個個의 品目에 각각 別個로 적용될 수 없고 複合的으로 考慮되어야 한다. 예컨대 地震의 影響을 樣討할 때엔 Lining 과 Shell 의 相互 Interaction 을 解析하여야 하며 Chimney 의 構造形態와 Shell 과 Lining 연결의 詳細처리시엔 施工方法도 研究되어야 하며 溫度의 影響을 反映할 때엔 各 部品間의 相對的 變化를 計算하여야 한다.

本稿에서 다 다루지 못한 미비한 부분에 대해서는 Chimney 種類別로 다음 기회에 說明할 수 있길 빈다. 끝.