

진동기초의 설계



정석재 실장
(주)쓰리디구조

1. 머릿말

KBC 2005에서는 “건축법에 따라 건축하거나 대수선하는 건축물 및 공작물의 구조체는 이 기준을 따라야 한다.”고 규정하고 있고, 공작물은 “굴뚝, 장식탑, 기념탑, 광고탑, 광고판, 고가수조, 옹벽, 지하대피호, 사일로 및 병커, 철탑, 기계식주차장, 승강기탑, 계단탑, 기름탱크, 냉각탑, 보일러 구조, 배관지지대, 육교, 조형물, 항공관제탑, 교통관제시설, 기계기초, 기타 지상구조물”로 정의함으로써 건축법에서 대상으로 하는 건축물과 공작물의 적용범위를 명확히 기술하고 있다. 본 고에서는 위 공작물 중 진동기초설계에 대하여 기본설계 이론과 실제 설계한 사례를 중심으로 살펴보고자 한다.

2. 진동기초 설계 개요

각종 산업시설 플랜트에는 이용 목적에 따라 수많은 기계들(터어빈, 모터 및 왕복운동기관, 프레스 등)이 설치되며 이러한 기계 중 진동을 일으키는 기계들을 지지하기 위한 기초의 설계는 일반 기초와는 달리 탑재된 기계진동에 의한 동적하중의 영향도 고려하여야 한다.

2.1 진동기계하중의 종류

- ① 회전기계에 의해 발생하는 하중 : 터어빈 발전기, 모터 등
→ 조화함수

$$F_{z, y} = P_0 \sin(\omega t) = m_e \omega^2 \sin(\omega t)$$

(m_e = 불평형 회전체의 질량, e = 회전중심으로부터 회전질량 무게 중심까지의 거리, ω = 각속도 rad/sec)

- ② 왕복기계에 의해 발생하는 하중 : 내연기관, 피스톤형의 펌프와 콤프레셔, 기타 → 왕복운동을 회전운동으로 또는 회전운동을 왕

복운동으로 바꾸어 주는 기본적인 크랭크 기구

$$F_z = (m_{rec} + m_{rot})\omega^2 \cos(\omega t) + m_{rec}r^2 / L\omega^2 \cos(2\omega t)$$

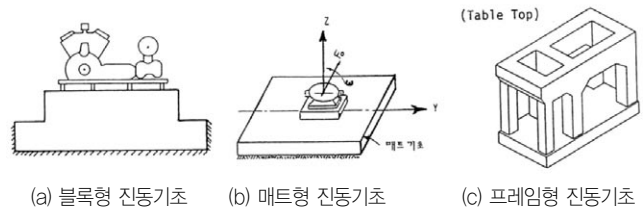
$$F_y = m_{rot}\omega^2 \sin(\omega t)$$

(m_{rec} = 전체왕복질량, m_{rot} = 전체회전질량, ω = 각속도, rad/sec, r = 각속도 ω 로 원점 O 주위를 회전하는 길이, L = 크랭크 길이)

- ③ 충격하중 : 펀치 프레스, 단조 햄머 등 → 실험에 의한 하중이력 곡선 필요

2.2 진동기초의 종류

- ① 블록형 기초 : 충격이나 주기가 긴 주기하중을 발생시키는 기계기초
- ② 매트형 기초
- ③ 프레임형 기초 : 터어빈 발전기와 같은 고속운전 기계기초



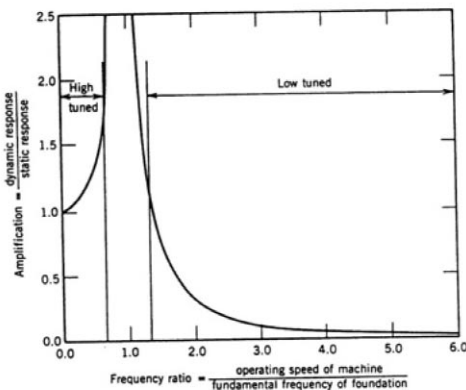
〈그림 1〉 진동기초의 종류

1.3 진동기초의 설계방법

기계로부터 발생하는 진동하중의 특성과 지반특성에 따라 적절한 기초형식을 선정하는 것이 매우 중요하다.

- (1) 기계 운전속도에 따른 진동기초의 선정

- ① 저속회전기계 (500rpm 이하)
 - 대형 왕복엔진, 콤프레서 등
 - 과진동설계(High Tuned Vibration Control, Overtuned Vibration Control)
 - 공진(Resonance)을 피하기 위하여 1차모드 고유진동수가 기계의 rpm보다 크게 설계
 - 지반과의 접지면적이 큰 블록형 기초를 채택
- ② 중속회전기계 (500rpm ~ 1000rpm)
 - 디젤 또는 가스엔진 등 중간 정도의 왕복엔진
 - 과다 또는 저진동기초로 설계
- ③ 고속회전기계 (1000rpm 이상)
 - 고속내연기관, 전기모터, 터빈 발전기 등
 - 저진동설계(Low Tuned Vibration Control, Undertuned Vibration Control)
 - 1차모드 고유진동수가 기계의 rpm보다 작게 설계
 - 기계의 시동 및 제동시 순간적인 공진현상 고려하여 설계
 - 중량의 블록형 기초 또는 프레임형 기초 채택



〈그림 2〉 High tuned & Low tuned

- (2) 예비단면가정
 - ① 블록형 기초
 - 원심기계를 지지하는 지내력기초 : 기초질량은 기계질량의 2~3배 이상
 - 왕복기계를 지지하는 지내력기초 : 기초질량은 기계질량의 3~5배 이상
 - 원심기계를 지지하는 파일기초 : 기초질량은 기계질량의 1.5~2.5배 이상
 - 왕복기계를 지지하는 파일기초 : 기초질량은 기계질량의 2.5~4배 이상
 - 파일은 설계 허용하중의 1/2 이상을 부담하지 않도록 설계
 - 지반의 허용지내력은 소요지내력의 1/2 이상을 부담하지 않도록 설계
 - ② 프레임형 기초
 - 기초 최소 두께 : $t = 0.1045L^{3/4}$ (L:기둥과 기둥 평균간격)

- (3) 지반동적특성 결정 → 흙의 전단탄성계수, 흙의 포아슨비 (지반의 동적특성치의 차이에 따라 그 결과가 크게 차이날 수 있으므로 정확한 데이터가 필요함)
- (4) 유한요소 해석
- (5) 진동기초의 설계기준
 - ① 최대진폭(Maximum Amplitude), 속도, 가속도 등 동적거동 한계 검토
 - ② 주요 진동모드 및 공진 검토(Resonance check)

2. 블록형 진동기초 설계 (Block Type Compressor Foundation Design)

2.1 설계개요

- (1) 적용기준 및 참고기준
 - ① American Concrete Institute (ACI)
 - ② German Codes (DIN)
 - ③ British Standards (BS)
- (2) 참고문헌
 - ① 기계기초 : 해석 및 설계 (Shamsher Prakash, Vijay K. Puri)
 - ② 건물설계 및 진동기계기초 (Suresh C. Arya, Michael W. O'Neill, George Pinus)

(3) 진동기준 제한

- ① 허용진동수 : $\frac{\text{Mechine Frequency}(\omega_n)}{\text{Natural Frequency}(f_n)}$, $f < 0.7$ or $f > 1.4$
- ② 허용진폭 : 50~100 μm

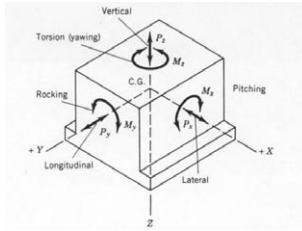
2.2 설계조건

- (1) 기계요소
 - ① 기계중량

항 목	무 계	개 수	중 량
컴프레서	1,500kg	1	1,500kg
모 터	190kg	1	190kg
부 속 품	510kg	1	510kg
합 계			2,200kg

② 불균형 하중과 모멘트

항 목	무 계
최대 수직하중(Fzt)	350kg
최대 수평하중(Fyt)	240kg
최대 Rocking 모멘트(Cxt)	-
최대 Pitching 모멘트(Cyt)	-
최대 Torsional 모멘트(Czt)	-



〈그림 3〉 Mode of Vibration

(2) Soil & Pile Data

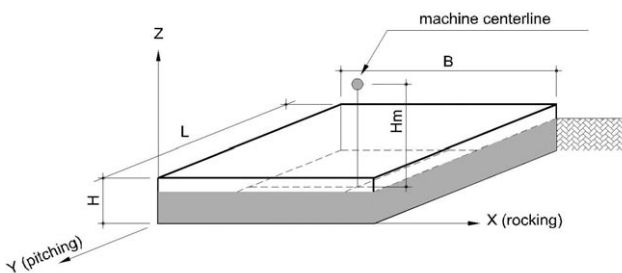
① Soil Data

비 중	1.8 tf/m ³	동적 전단계수(Pile part)	4,000 tf/m ²
포아손비(μ)	0.4	동적 전단계수(Backfill part)	210,000 tf/m ²

② Pile Data (PHC Pile Φ 400)

탄성계수	4,000,000tf/m ²	두께	0.0650m
전단탄성계수	21,428,571tf/m ²	직경	0.40m
단면2차모멘트	102,100cm ⁴	허용내력	70tf/ea
단면적	0.0702m ²	비중	2.5tf/m ³

2.3 예비단면가정



〈그림 4〉 단면형상

기계 자중(Wm)		2.2tonf
기초 자중(W)		26.9tonf
파일캡 자중(Wp)		18.4tonf
기초 수직두께(H)		0.90m
기초 폭(B)		3.15m
기초 길이(L)		2.70m
기초에서 기계무게중심까지의 수직거리(Hm)		2.30m
파일의 수직허용 설계하중(Ra)		70.0tonf
파일의 개수		4ea
기계의 무게중심	x = 1.58 m	y = 1.39m
매스의 무게중심	x = 1.58 m	y = 1.46m
파일의 무게중심	x = 1.58 m	y = 1.45m

- (1) $W_f / W_m \geq 5.0$, $26.9 / 2.2 = 12.24 \geq 5.0$ ∴ O.K
- (2) $H \geq \text{Max}(0.6, \text{Max}(B/10, L/10))$, $0.90 \geq 0.60$ ∴ O.K
- (3) $L \geq 1.0 H_m$, $2.70 \geq 2.30$ ∴ O.K
- (4) $W_p / W_m \geq 2.5$, $18.4 / 2.2 = 8.35 \geq 2.5$ ∴ O.K
- (5) $(W_m+W_f) / n < R_a \times 0.5$, $7.3 \leq 35.0$ ∴ O.K
- (6) C.O.G기초와 C.O.G기계의 오차 < 5.0%

$$e_x = (X_{\text{Foundation}} - X_{\text{Machine}}) / \text{Min.}(B,L) = 0.11\%$$

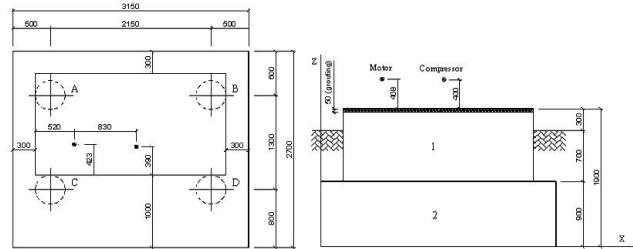
$$e_y = (Y_{\text{Foundation}} - Y_{\text{Machine}}) / \text{Min.}(B,L) = 2.34\% \quad \therefore \text{O.K}$$

C.O.G매스와 C.O.G파일의 오차 < 5.0%

$$e_x = (X_{\text{File}} - X_{\text{Mass}}) / \text{Min.}(B,L) = 0.02\%$$

$$e_y = (Y_{\text{File}} - Y_{\text{Mass}}) / \text{Min.}(B,L) = 0.42\% \quad \therefore \text{O.K}$$

2.4 기초평면도 및 단면도



〈그림 5〉 기초평면도 및 단면도

2.5 동적해석

(1) 파일 스프링 상수

MODE	Single Pile(K ^g)	Group Effect(K ^g)	Embedment Effect(K ^t)	스프링상수
Vertical	56,160	23,857	24,300	$K_z=K_z^g+K_z^l=48,157\text{tf/m}$
Horizontal	18,889	11,003	36,900	$K_x=K_x^g+K_x^l=47,903\text{tf/m}$
Rocking	-	188,754	69,884	$K_\psi=K_\psi^g+K_\psi^l=258,637\text{tf/rad}$
Pitching	-	304,030	69,884	$K_\phi=K_\phi^g+K_\phi^l=373,914\text{tf/rad}$
Torsional	-	-	-	$\Sigma(K_\phi^l+K_x^l(X_r^2+Y_r^2))=88,425\text{tf/ra}$

(2) 파일 댐핑 상수

MODE	Single Pile(Cs)	Group Effect(Cg)	Embedment Effect(Cf)	댐핑 상수
Vertical	114	48.5	425.4	$C_z=C_z^g+C_z^l=473.5\text{tf-s/m}$
Horizontal	61	35	672	$C_x=C_x^g+C_x^l=708.0\text{tf-s/m}$
Rocking	-	393.6	473	$C_\psi=C_\psi^g+C_\psi^l=866\text{tf-m/rad}$
Pitching	-	628	473	$C_\phi=C_\phi^g+C_\phi^l=1,101\text{tf-m/rad}$
Torsional	-	-	-	$\Sigma(C_\phi^l+C_x^l(C_r^2+C_r^2))=274\text{tf-sec/rad}$

(3) Mass & Mass moment of Inertia

Mass No.	Mass	C.O.G(m)			Mx	My	Mz
		X	y	z			
1	0.87	1.58	1.7	1.40	1.38	1.48	1.22
2	1.87	1.58	1.35	0.45	2.95	2.53	0.84
Comp.	0.15	1.65	1.39	2.30	0.25	0.21	0.35
Motor	0.02	0.82	1.42	2.31	0.02	0.03	0.04
Accessory	0.05	1.65	1.39	2.30	0.09	0.07	0.12
Total	3.0	1.58	1.46	0.87	4.68	4.33	2.53

① Mass moment of Inertia for Rocking Motion(I_{ψ})

$$I_{\psi} = M \times (y^2 + z^2) / 12 + M \times L^2 = 3.76t\text{-sec}^2\text{-rad}$$

② Mass moment of Inertia for Pitching Motion(I_{ϕ})

$$I_{\phi} = M \times (x^2 + z^2) / 12 + M \times L^2 = 4.46t\text{-sec}^2\text{-rad}$$

③ Mass moment of Inertia for Torsional Motion(I_{θ})

$$I_{\theta} = M \times (x^2 + y^2) / 12 + M \times L^2 = 4.88t\text{-sec}^2\text{-rad}$$

(4) 진동 및 진폭

Item.	Formula	Vertical	Horiz- ontal	Rock- ing	Pitch- ing	Torsio- nal
Natural Frequency	$f_n=60/2\pi(K/m)$	1,672 rpm	1,442 rpm	2,506 rpm	2,766 rpm	1,285 rpm
Resonance Frequency	$f_m=f_n (1\sqrt{-2 \times D^2})$	1,082 rpm	-	1,963 rpm	2,207 rpm	1,228 rpm
Magnification Factor	$M=1/((1-r^2)^2 + \sqrt{2 \times D \times r})^2)$	1.026	0.956	1.018	1.015	1.112
Amplitude at Frequency ωn	$R=M \times F/K$	$3,944 \times 10^{-6}m$	$3,390 \times 10^{-6}m$	$1,443 \times 10^{-6} rad$	$0,071 \times 10^{-6} rad$	$0,226 \times 10^{-6} rad$
Transmissibility Factor	$Tr=(1+\sqrt{2 \times D \times r})/xM$	1.065	1.075	1.030	1.024	1.123

2.6 검토 결과

(1) operating frequency의 진동진폭 검토

- ▶ operating frequency의 최대 유효진폭

$$\delta_{max} = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)} = 8.03\mu m < 50\mu m \quad \therefore O.K$$

(2) Magnification Factor

- ▶ 모든 Magnification Factor가 1.5보다 작아야 한다.

(3) 공진 검토

방향	값	주기
Vertical	$f_{m,z}$ 1,082rpm	$> \omega n/0.7$ (Resonance will not occur)
Horizontal	$f_{m,y}$ 1-2Dr2<0	No Resonance can occur
Rocking	$f_{m,\psi}$ 1,963rpm	$> \omega n/0.7$ (Resonance will not occur)
Pitching	$f_{m,\phi}$ 2,207rpm	$> \omega n/0.7$ (Resonance will not occur)
Torsion	$f_{m,\theta}$ 1,228rpm	$> \omega n/0.7$ (Resonance will not occur)

3. 프레임형 진동기초 설계(Frame Type Compressor Foundation Design)

3.1 설계개요

(1) 진동기준 제한

- ① 허용진동수 한계

$$\text{Frequency ratio}(f) : \frac{\text{Mechine Frequency}(\omega n)}{\text{Natural Frequency}(f_n)} \quad , f < 0.7 \text{ or } f > 1.4$$

$$\text{Frequency raton}(f) : \frac{\text{Mechine 1st Critical Frequency}(\omega c)}{\text{Natural Frequency}(f_n)}$$

3.2 설계조건

(1) 기계요소

- ① 기계중량

항목	Mass of Equipment	Mass for maintenance	Mass of Rotor	Max. expected unbalance F.
컴프레서	45,800kg	19,800kg	2,160kg	1,080kg
터어빈	9,600kg	4,500kg	1,600kg	800kg
베이스 플레이트	11,500kg	- kg	- kg	- kg
Piping & Auxili	2,000kg	- kg	- kg	- kg
합 계	68,900kg	24,300kg	3,760kg	1,880kg

② 기계특성 및 설계조건

Speed(rpm), Rated	6,041rpm
- First Critical(rpm)	3,000rpm
- Second Critical(rpm)	9,200rpm
Vibration	
- Allowable Test Level	43.0 μm
Velocity of Foundation	
- Max. Vibration Velocity	2.5mm/s

(2) Soil & Pile Data

- ① Soil Data

비중	1.8 tf/m	동적 전단계수(Pile part)	4,000tf/m
포아송비(ν)	0.4	동적 전단계수(Backfill part)	10,000tf/m ²

② Pile Data (PHC Pile 400)

탄성계수	4,000,000tf/m ²	두께	0.0650m
전단탄성계수	1,428,571tf/m ²	직경	0.40m
단면 2차 모멘트	102,100cm ⁴	허용내력	70tf/ea
단면적	0.0702cm ²	비중	2.5tf/m ³

3.3 예비단면가정

Compressor operating speed(Cop)	2.2tf
Average of two spans between columns(L)	26.9tf
기계 하중(Wm)	18.4tf
매트를 포함한 구조물의 총 중량	0.90m
Weight of the top half of the structure(Wh)	
(slab : 108.9 tf, column : 65.0 tf)	3.15m
파일의 수직하중 설계하중(Ra)	70.0tf
파일의 개수	4ea
C.O.G machine plus top half structure	y = 2.897m
The center of column resistance	y = 2.900m
The center of gravity of the Mass	y = 2.901m
The center of gravity of the pile	y = 2.900m

(1) 최소 매트두께

$$t = 0.1045 \times L^{4/3} = 0.67 \leq 1.60 \quad \therefore \text{O.K}$$

(2) 매트중량 > Top half structure plus machinery weight

$$= 269.3 > 242.7 \quad \therefore \text{O.K}$$

(3) $Wt > 3.0 \times Wm$, $595.0 > 206.7 \quad \therefore \text{O.K}$

(4) $Wh > 1.0 \times Wm$, $173.8 > 68.9 \quad \therefore \text{O.K}$

(5) 빔의 휨강성 > 2.0 × 기둥의 휨강성

$$\text{최소 빔깊이} > 1/5 \times \text{순 간격} \quad \therefore \text{O.K}$$

여기서 : Pa : column's axial capacity(tonf)

Pv : actual column static loads(tonf)

(6) $(Wm+Wt)/n < Ra \times 0.5$, $31.6 \leq 35.0 \quad \therefore \text{O.K}$

(7) C.O.G(pile)과 C.O.G(mass)의 거리 < 30cm

$$= \sqrt{(X_{pile} - X_{mass})^2 + (Y_{pile} - Y_{mass})^2} = 1.4\text{cm} \quad \therefore \text{O.K}$$

(8) Eccentricity the center of column resistance & the center of gravity of the machine plus the top half the top half of the structure < 5.0%

$$ex = (x_{col} - x_{top}) / \text{mat dimen}_{min} = 3.13 \%$$

$$ey = (y_{col} - y_{top}) / \text{mat dimen}_{min} = 0.05 \% \quad \therefore \text{O.K}$$

(9) 기둥의 최저 고유진동수(fn) > 1.4 × Cop

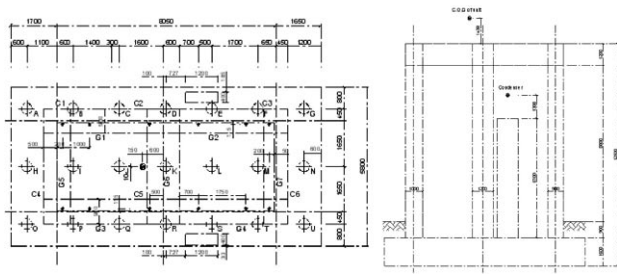
$$fn = (36690 \times fck^{0.25}) / \sqrt{(\rho \times L)} = 22484 > 8457 \quad \therefore \text{O.K}$$

여기서, fck : 28일 콘크리트 강도(kgf/cm²)

ρ : 실제 기둥축중력(kgf/cm²)

L : 기둥 높이(cm)

3.4 기초평면도 및 단면도



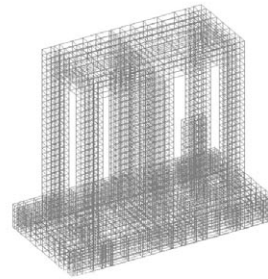
<그림 6> 기초평면도 및 단면도

2.5 동적해석

(1) 파일 스프링 상수의 계산

Mode	Single Pile(Ks)	Group Effect(Kg)	Embedment Effect(Kf)	스프링상수
Vertical	825,552	175,716	무시	Kz = 175,716 tf/m
Horizontal	277,875	130,000		Kx = 130,000 tf/m
Rocking	-	5,534,618		Kψ = 5,534,618tf/rad
Pitching	-	30,795,973		Kφ = 30,795,973tf/rad
Torsional	-	2,875,374		Kθ = 2,875,374tf/rad

(2) 해석모델



<그림 7> 해석모델

(3) 진동수

Mode	Frequency (f) Hz	ωn/fn (operating)	ωc/fn(1st critical)	판정
1	1.55	64.82	32.19	O.K
2	1.80	56.00	27.81	O.K
3	1.89	53.19	26.42	O.K
4	2.59	38.94	19.34	O.K
5	4.58	21.98	10.91	O.K
6	5.04	19.99	9.93	O.K
7	5.12	19.68	9.77	O.K
8	8.39	12.00	5.96	O.K
9	10.56	9.53	4.73	O.K
10	10.78	9.34	4.64	O.K

(4) Max. & Min. of Amplitude (m)

LOAD	X-DIR	Y-DIR	Z-DIR
Max	2.16E-07	1.50E-05	2.17E-06
Min	-2.00E-07	-1.30E-05	-2.20E-06

(5) Max. & Min. of Velocity (m/sec)

LOAD	X-DIR	Y-DIR	Z-DIR
Max	3.12E-05	2.49E-04	8.72E-05
Min	-3.10E-05	-1.94E-04	-1.09E-04

(6) Max. & Min. of Acceleration(m/sec²)

LOAD	X-DIR	Y-DIR	Z-DIR
Max	2.06E-02	1.16E-01	5.16E-02
Min	-2.01E-02	-1.16E-01	-4.98E-02

2.6 검토 결과

(1) operating frequency의 진동진폭 검토

$$\delta_{\max} = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)} = 12.12\mu\text{m} < 43\mu\text{m} \quad \therefore \text{O.K}$$

(2) operating frequency의 진동속도 검토

$$\Rightarrow 0.236\text{mm/sec} < 2.50\text{mm/sec}$$

(3) 공진현상 검토

- Compressor Operating Speed(ω_n) : 100.7 cps (6,041 rpm)

- Compressor 1st Critical Speed(ω_c) : 50.0 cps (3,000 rpm)

$$f = \omega_n / f_n, f < 0.7 \text{ for } f > 1.4$$

$$f = \omega_c / f_n, f < 0.5 \text{ for } f > 1.5$$

진동수는 허용진동수 제한기준에 합당하다

(4) 기둥의 공진현상 검토

$$\begin{aligned} \blacktriangleright f_n &= (36690 \times fck^{0.25}) / \sqrt{\rho \times L} \\ &= 23606 > 16,041 \times 1.4 = 8,457 \end{aligned}$$

4. 맺음말

지금까지 Compressor 진동기초 중 블록타입 기초와 프레임 타입기초 설계 예를 실제 사례를 통하여 간략하게 소개하였다.

그밖에 진동기초로는 3000rpm 이상의 고속 터빈 발전기(Turbine Generator), 기계자중이 1000톤이 넘는 저속의 대형 디젤엔진 기초, 충격해머(Impact Hammer) 기초 등 다양한 진동기초가 있으며, 격리장치(Isolator)를 사용하는 경우도 많이 있으므로 이에 대한 설계 사례에 대해서는 다음 기회에 소개하고자 한다.

참고 문헌

1. Shamsher Prakash, Vijay K. Puri, "Foundations for Machines : Analysis and Design", Wiley-Interscience Publication, 1988.
2. Suresh C. Arya, Michael W. O'Neill, George Pinus, "Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines", Gulf Publishing Company, 1979.
3. 제철엔지니어링 주식회사, "진동기초 설계법", 1990.
4. 한국전산구조공학회, "진동기계기초 해석 및 설계지침서"
5. Paz, "Structural Dynamics", Van Nostrands, 1985.
6. J.L. Humar, "Dynamics of Structures", Pentice Hall, 1990.