

9장 미끄럼 베어링

9장 미끄럼 베어링 9-1

베어링이란?
축과 하우징 사이의 상대운동을 원활하게 하며 축으로부터 전달되는 하중을 지지

베어링 분류
내부의 접촉방식에 따라

- 구름 베어링
- 미끄럼 베어링

 축하중을 지지하는 방향에 따라

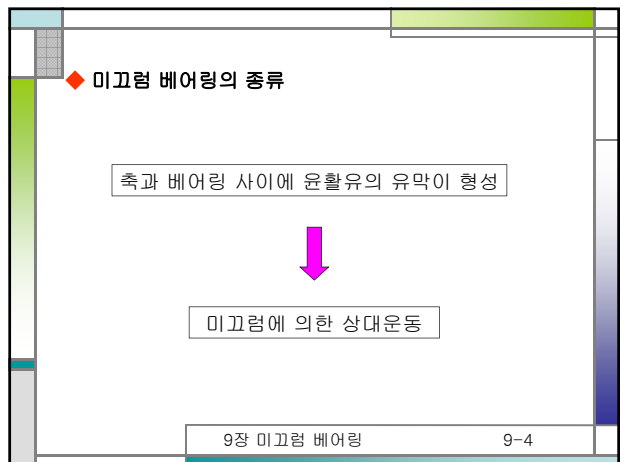
- 레이디얼 베어링
- 슬러스트 베어링

9장 미끄럼 베어링 9-2

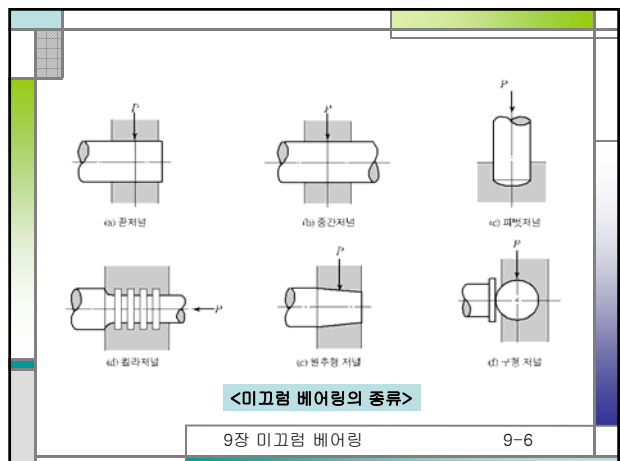
<미끄럼 베어링과 구름 베어링의 비교>

항목	미끄럼 베어링	구름 베어링
기동토크	유막형성이 낮은 경우 크다.	기동 토크가 적다.
충격 흡수	유막에 의한 감쇠력이 우수하다	감쇠력이 적아 충격흡수력이 적다.
간관성	제작성이 전문지식이 필요하다.	설치가 간편하다.
강성	작다.	크다.
윤전속도	공진속도를 지나 윤전할 수 있다	공진속도 이내에서 윤전하여야 한다.
고온	윤활유의 점도가 증가한다.	전동체의 열팽창으로 고온시 냉각장치 필요
규격화	자가제작하는 경우가 많다.	표준형 양산품이다. 호환성이 높다.

9장 미끄럼 베어링 9-3



- ※ 축과 베어링 사이의 압력유지 방법에 따라 정압 베어링과 동압 베어링
 - ※ 축과 베어링 사이에서 작용하는 유체의 종류에 따라 기름 베어링과 공기 베어링
 - ※ 기름 베어링의 내경형태에 따라
 - 진원형 베어링, 2로브 베어링, 3로브 베어링
 - 4로브 베어링, 압력댐 베어링
- 9장 미끄럼 베어링 9-5



◆ 마찰의 종류

1. 상대운동에 의한 분류

(1) 미끄럼 마찰

운동의 분류	마찰력의 크기	조건
움직이기 전	$F = P$	$P < \mu_s N$
움직이는 순간	$F = \mu_s N$	
움직일 후	$F = \mu_k N$	

<마찰력의 크기>

9장 미끄럼 베어링 9-7

2. 마찰면의 상태에 따른 분류

(1) 고체마찰

- 마찰면 사이에 윤활제가 없는 건조마찰
- 마찰계수는 0.1~1.0

(2) 유체마찰

- 마찰면 사이에 유막이 형성
- 마찰계수는 0.001~0.01

(3) 경계마찰

- 유막이 극히 얇은 상태
- 마찰계수는 0.01~0.1

9장 미끄럼 베어링 9-8

◆ 점성유체에 대한 뉴턴의 법칙

1. 유체의 전단력

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

τ 는 전단력
 η 는 점성계수
 $\frac{du}{dy}$ 는 높이변화에 따른 속도구배

9장 미끄럼 베어링 9-9

<전단력과 속도구배>

판의 면적이 A이고 속도가 선형적으로 변하면

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{du}{dy} = \eta \frac{U}{h}$$

9장 미끄럼 베어링 9-10

2. 점도 및 점도 측정

(1) 점도

유체의 점도 → 절대점성계수 η 로 표현

1포아즈[p](poise)는 1cm의 유막두께로 면적 1cm²의 판을 1cm/s의 속도로 움직일 때 힘이 1dyne일 때의 점도

$$1[\text{poise}] = 1[\text{dyne} \cdot \text{s} / \text{cm}^2] = 0.1[\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

실용단위로 센티포아즈[cp](centi-poise) 사용

$$1[\text{cp}] = \frac{1}{100}[\text{p}]$$

9장 미끄럼 베어링 9-11

동점성계수 ν 는

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

단위로 스토크[St](Stoke)가 사용

$$1[\text{St}](\text{Stoke}) = 1[\text{cm}^2 / \text{s}]$$

$$1[\text{cSt}] = \frac{1}{100}[\text{St}]$$

9장 미끄럼 베어링 9-12

(2) 점도 측정

SUV : 일정온도에서 60cc의 기름이 표준 모세관 속을 통과하는데 소요되는 시간을 초(sec)로 나타낸 값

$$\eta[cp] = \rho \left(0.22 \cdot SUV - \frac{180}{SUV} \right)$$

(3) 기름온도와 밀도와의 관계

$$\rho_t = \rho_0 - 0.000657(t - t_0)$$

9장 미끄럼 베어링 9-13

◆ 페드로프(petroff)의 베어링 식

<페드로프식의 가정>

9장 미끄럼 베어링 9-14

유막의 전단응력은

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} = \eta \frac{1}{\delta} \cdot \left(r \cdot \frac{2\pi N}{60} \right)$$

전단응력으로 인한 토크손실

$$T = \tau A r = \eta \frac{2\pi r}{\delta} \cdot \frac{N}{60} \cdot 2\pi r l \cdot r$$

베어링의 평균압력

$$p = \frac{P}{2rl}$$

9장 미끄럼 베어링 9-15

마찰력에 의한 토크는

$$T = \mu P \cdot r = \mu (p 2rl) r = 2\mu r^2 l p$$

마찰계수를 계산하면

$$\mu = \frac{\pi^2}{30} \cdot \eta \cdot \frac{N}{p} \cdot \frac{r}{\delta}$$

$\eta \frac{N}{p}$ 는 베어링 정수
 $\frac{r}{\delta}$ 는 틈새비(ϕ)

9장 미끄럼 베어링 9-16

<스트리벡(Stribeck) 곡선>

9장 미끄럼 베어링 9-17

◆ 레이놀드(Reynold) 방정식

<베어링 내의 유체흐름>

$$p dy - \left(p + \frac{dp}{dx} dx \right) - \tau dx + \left(\tau + \frac{d\tau}{dy} dy \right) dx = 0$$

9장 미끄럼 베어링 9-18

정리하면

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dy} = \eta \frac{d^2u}{dy^2}$$

적분하면

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} y^2 + C_1 y + C_2$$

경계조건

$$u = \frac{U(h-y)}{h} - \frac{y(h-y)}{2\eta} \frac{dp}{dx}$$

단위 폭당 유량

$$Q = \int_0^h u dy = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{dp}{dx}$$

9장 미끄럼 베어링 9-19

미분하여 정리하면

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{dp}{dx} \right) = 6U \frac{dh}{dx}$$

<1차원 흐름을 고려한 레이놀드 방정식>

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6U \frac{dh}{dx}$$

<2차원 흐름을 고려한 레이놀드 방정식>

9장 미끄럼 베어링 9-20

◆ 유막에서 압력의 형성원리

<레이디얼 저널 베어링 내의 압력분포>

9장 미끄럼 베어링 9-21

<유막형성의 물리적 의미>

- 유막효과 : 압력이 발생
- 신축효과 : 압력이 높아짐
- 짜내기 효과 : 압력발생의 원인

9장 미끄럼 베어링 9-22

◆ 저널베어링 설계에 필요한 변수

1. 폭경비(l/d)

- 베어링 폭을 축지름으로 나눈 값
- 일반적으로 0.25~2
- 값이 작으면 하중을 지지하는 능력이 낮아짐
- 값이 크면 하중을 지지할 수 있는 능력이 커짐
- 고하중이 고속회전하는 경우 0.25~0.5로 한다.

9장 미끄럼 베어링 9-23

2. 베어링의 평균압력(p_m값)

$$p_m = \frac{P}{dl}$$

3. 발열계수(pv값)

베어링의 평균압력과 원주속도의 곱 pv

- pv값이 크면 베어링의 폭을 길게 할 수 있다.
- 계수값이 작으면 베어링 폭을 짧게 해야 한다.

9장 미끄럼 베어링 9-24

<로셀(Rotscher)의 한계 발열계수(pv값)>

베어링 종류	발열계수 [$kg_f / mm^2 \cdot m / s$]
증기기관 주축 베어링	0.15~0.20
내연기관 화이트메탈 베어링	0.30이하
내연기관 포금 베어링	0.25이하
선박베어링	0.30~0.40
전동축 베어링	0.10~0.20
왕복기계 크랭크 핀	0.25~0.35
크랭크 축의 화이트메탈 베어링	0.50
선박용 베어링의 크랭크 핀	0.50~0.70
철도차량의 차축	0.50
기관차의 차축	0.65

9장 미끄럼 베어링 9-25

<피벗 베어링의 한계 발열계수(pv값)>

베어링 종류	발열계수 [$kg_f / mm^2 \cdot m / s$]
보통 피벗베어링	0.17이하
펌프로 윤활하는 경우	0.04~0.08
크레인(냉각하지 않음)	0.04
수력 터빈	0.15~0.25
냉각시키는 경우	0.08

9장 미끄럼 베어링 9-26

4. 베어링 정수($\eta N/p$)

일반베어링은 베어링정수를 기준으로 설계

<최소 베어링 정수와 틈새비>

베어링 금속	베어링 정수 $\eta \frac{N}{p}$	틈새비 (δ/r)
Sn기 화이트 메탈(babbit metal)	48×10^{-8}	$(0.5-1.0) \times 10^{-3}$
Pb기 화이트 메탈	24×10^{-8}	$(0.5-1.0) \times 10^{-3}$
카드뮴 합금	0.85×10^{-8}	$(0.8-1.0) \times 10^{-3}$
켈릿(kelmet) (Cu와 Pb의 합금)	0.85×10^{-8}	$(1.2-1.5) \times 10^{-3}$
은-납-인듐(Ag-Pb-In)	0.5×10^{-8}	$(1.2-1.5) \times 10^{-3}$

9장 미끄럼 베어링 9-27

5. 좀머펠트 수(Sommerfeld number)

좀머펠트 수가 같으면 같은 베어링으로 취급하고 설계

$$S = \left(\frac{r}{\delta}\right)^2 \frac{\eta N}{p}$$

δ 는 축과 베어링 사이의 반경방향 틈새
 r 은 축의 반지름

9장 미끄럼 베어링 9-28

6. 최소유막 두께(h_{min})

축과 베어링 사이의 최소거리

<베어링 허용 최소 유막두께 h_{min} >

베어링 금속 및 표면상태	최소 유막두께 [mm]	적용
청동 또는 켈릿(kelmet)의 최상다듬질	0.002~0.004	항공기 및 자동차 엔진
보통 화이트 메탈	0.01~0.03	전동기, 발전기
일반 대형 베어링	0.05~0.10	터빈, 송풍기

9장 미끄럼 베어링 9-29

◆ 베어링 재료

1. 베어링 재료의 구비조건

- ① 마모가 적고 내구성이 클 것
- ② 충격하중에 강할 것
- ③ 강도와 강성이 클 것
- ④ 내식성이 좋을 것
- ⑤ 가공이 쉬울 것
- ⑥ 열변형이 적고 열전도율이 좋을 것

9장 미끄럼 베어링 9-30

2. 베어링 재료의 종류

- (1) 주철
 - 단단하며 내마모성이 강함
 - 저속 저압용 베어링
- (2) 구리합금
 - 단단하고 융점이 높다
 - 열전도도가 좋고 마멸, 충격에 잘 견딤

9장 미끄럼 베어링 9-31

- (3) 화이트 메탈(white metal)
 - 연한 금속을 주성분으로 한 백색합금
- (4) 카드뮴 합금
 - 고하중의 내연기관에 사용
- (5) 알루미늄 합금
 - 가볍고, 내마멸성, 열전도성 우수
 - 고속, 고하중용 베어링

9장 미끄럼 베어링 9-32

- (6) 포유 소결합금(包油 燒結合金)
 - 공기 및 기름을 함유할 수 있다
 - 급유가 곤란하거나 급유하지 않는 베어링에 사용
- (7) 비금속재료
 - 흑연, 플라스틱등의 재료로 만들
 - 펌프, 선박의 프로펠러축 등으로 사용

9장 미끄럼 베어링 9-33

<미끄럼 베어링용 금속재료의 성능>

베어링 재료	대략적 경도 H_B	속의 최소경도 H_B	최대 허용압력 [MPa]	최고 허용온도 [°C]
주 철	160~180	200~250	3~6	150
포 금	50~100	200	7~20	200
청 동	80~150	200	15~60	200
인청동	100~200	300	6~10	250
Sn기 화이트 메탈	20~30	150 이하	6~8	150
Pb기 화이트 메탈	15~20	150 이하	8~10	250
알칼리 경화 납	22~25	200~250	10~14	250
카드뮴 합금	30~40	200~250	10~18	170
연 동	20~30	300	20~32	220~250
인청동	40~80	300	28	100
알루미늄합금	45~50	300	30 이상	150
은박층 비록입입	25	300	30 이상	250
층메탈(화이트 피복)	-	230 이하	-	100~150

9장 미끄럼 베어링 9-34

500 [rpm]으로 회전하는 축으로부터 400 [kg]의 반경방향하중을 받는 저널베어링의 폭경비가 1.5이다. 윤활유의 점도가 60 [cp]이고 $nN/p = 40 \times 10^4$ [cp · rpm · mm² / kg]일 때 베어링의 길이와 지름을 설계하여라.

9장 미끄럼 베어링 9-35

풀이 베어링의 길이와 지름을 구하기 위해 베어링계수를 고려한다.

$$\frac{nN}{p} = nN \frac{dl}{P}$$

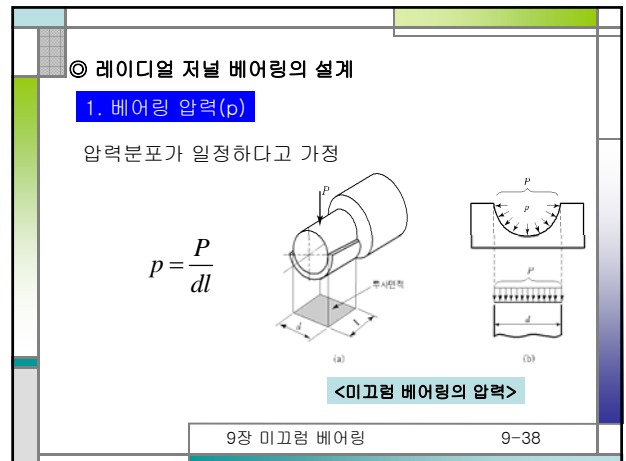
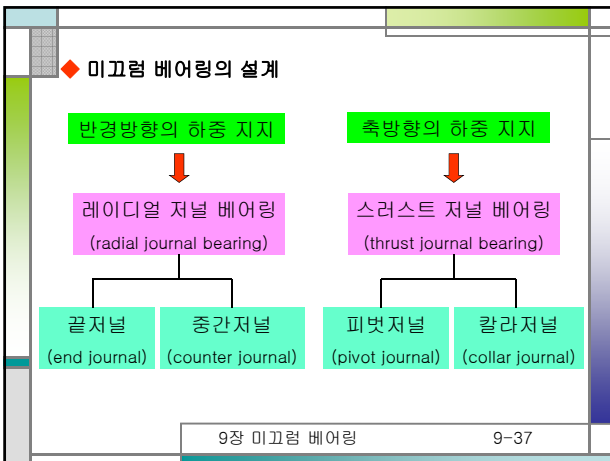
$$\text{정리하면 } dl = \frac{nN/P}{nN/p}$$

폭경비에서 $l = 1.5d$ 이므로

$$d = \sqrt{\frac{nN/p}{1.5 \times (nN/P)}} = \sqrt{\frac{40 \times 10^4}{1.5 \times (60 \times 500/400)}} = 59.63 \approx 60 \text{ [mm]}$$

$$l = 1.5d = 1.5 \times 60 = 90 \text{ [mm]}$$

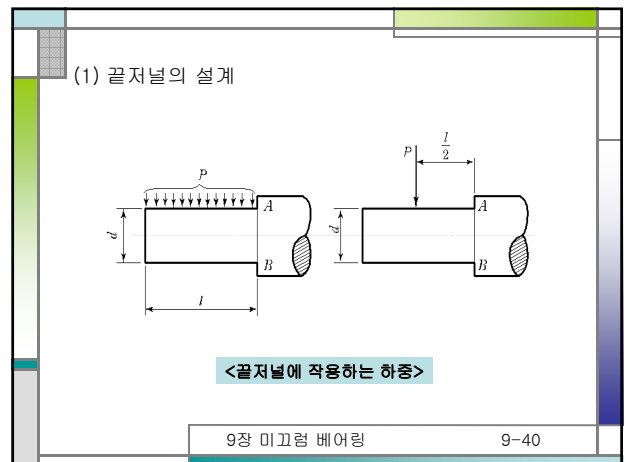
9장 미끄럼 베어링 9-36



2. 축의 강도를 고려한 저널의 설계

- 압력이 일정한 크기로 분포한다고 가정
- 압력을 베어링 중앙지점에 해당하는 축부분에 작용하는 집중하중 형태로 대체
- 이 하중에 견디는 축지름을 계산
- 베어링 지름은 축지름에 따라 설계

9장 미끄럼 베어링 9-39



① 지름설계 ② 폭설계

$M_b = \frac{Pl}{2}$ 에서

$$\sigma = \frac{M_b y_{\max}}{I_{yy}} = \frac{16Pl}{\pi d^3}$$

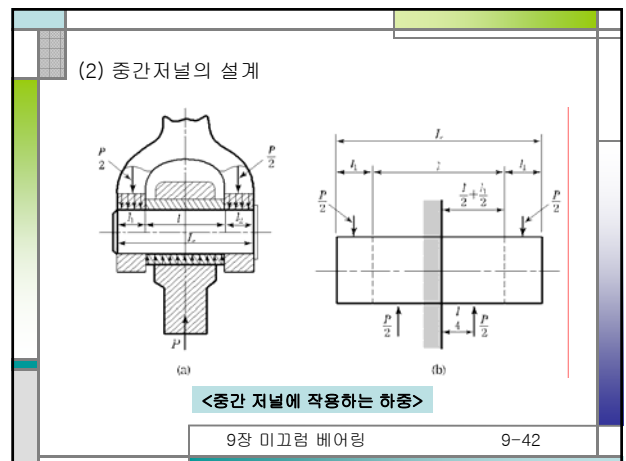
정리하면

$$d = \sqrt[3]{\frac{16Pl}{\pi \sigma_a}}$$

$P = pld$

$$\frac{l}{d} = \sqrt{\frac{\pi \sigma_a}{16 p}}$$

9장 미끄럼 베어링 9-41



1. 칼라 베어링 (collar bearing)

(1) 베어링 압력(p)

$$p = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)Z}$$

P는 축방향으로 베어링에 가해지는 힘
Z는 칼라의 수

9장 미끄럼 베어링

9-49

(2) 발열계수(pv)

$$pv = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)Z} \cdot \frac{(d_2 + d_1)/4}{1000} \cdot \left(\frac{2\pi N}{60}\right)$$

정리하면

$$d_2 - d_1 = \frac{P \cdot N}{30000 \cdot Z \cdot p \cdot v} [mm]$$

N은 회전각속도[rpm]

v는 평균반지름에서의 원주속도[m/s]

9장 미끄럼 베어링

9-50

2. 피벗 베어링 (pivot bearing)

칼라베어링에서 칼라의 수 Z가 1인 경우와 동일

(1) 베어링 압력(p)

$$p = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)}$$

(2) 발열계수(pv)

$$d_2 - d_1 = \frac{P \cdot N}{30000 \cdot p \cdot v} [mm]$$

9장 미끄럼 베어링

9-51



3000 [rpm]으로 회전하는 축을 지지하는 피벗 저널베어링이 있다. 베어링의 바깥지름이 140 [mm]이고 안지름이 60 [mm]이다. 허용베어링압력을 0.15 [kg/mm²]으로 하면 지지할 수 있는 축방향 하중은 얼마인가? 그리고 마찰계수가 0.02라면 발열계수와 마찰손실 동력 [PS]는 얼마인가?

9장 미끄럼 베어링

9-52

풀이 $p = \frac{P}{\frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)}$ 에서

$$P = \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)p = \frac{\pi}{4}(140^2 - 60^2) \times 0.15 = 1884.96 \text{ [kg]}$$

피벗 베어링의 평균 원주속도

$$v = \left(\frac{d}{2}\right) \left(\frac{2\pi N}{60}\right) = \left(\frac{d_1 + d_2}{4}\right) \left(\frac{2\pi N}{60}\right) \text{ 에서}$$

$$v = \frac{(d_1 + d_2)\pi N}{2 \times 1000 \times 60} = \frac{(140 + 60) \times \pi \times 3000}{2 \times 1000 \times 60} = 15.71 \text{ [m/s]}$$

발열계수 $pv = 0.15 \times 15.71 = 2.36 \text{ [kg/mm}^2 \cdot \text{m/s]}$

마찰동력손실 $H = \frac{1}{75} \frac{Pv}{75} = \frac{0.02 \times 1884.96 \times 15.71}{75} = 7.9 \text{ [PS]}$

9장 미끄럼 베어링

9-53



바깥지름이 500 [mm], 안지름이 400 [mm]의 칼라베어링이 200 [rpm]으로 회전하는 축으로부터 3000 [kg]의 축방향 하중을 받는 경우 칼라의 수를 얼마로 하면 되는가? (단, $pv = 0.05 \text{ [kg/mm}^2 \cdot \text{m/s]}$ 로 한다)

풀이 $v = \frac{(d_1 + d_2)\pi N}{2 \times 1000 \times 60} = \frac{(500 + 400) \times \pi \times 200}{2 \times 1000 \times 60} = 4.71 \text{ [m/s]}$

$$p = \frac{0.05}{v} = \frac{0.05}{4.71} = 0.011 \text{ [kg/mm}^2]$$

$$P = \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2)pZ \text{ 에서 } Z = \frac{4P}{\pi(d_2^2 - d_1^2)p} = \frac{4 \times 3000}{\pi(500^2 - 400^2) \times 0.011} = 3.86$$

칼라의 수를 4개로 한다.

9장 미끄럼 베어링

9-54

예제
9-7

2530 [rpm]으로 회전하는 축으로부터 750 [kg_f]의 축방향 하중을 받는 칼라 베어링에서 칼라의 안지름이 110 [mm]이면 칼라의 바깥지름은 얼마로 하면 되겠는가? 그리고 마찰손실동력은 얼마인가?(단, 칼라의 수는 4개이고 $p = 0.03$ [kg_f/mm²], 마찰계수는 0.02이다)

풀이 (1) $P = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) p Z$ 에서

$$d_2^2 = d_1^2 + \frac{4P}{\pi p Z}, \quad d_2 = \sqrt{110^2 + \frac{4 \times 750}{\pi \times 0.03 \times 4}} = 141.63 \text{ [mm]}$$

$$(2) v = \frac{(d_1 + d_2) \pi N}{2 \times 1000 \times 60} = \frac{(110 + 141.63) \times \pi \times 2530}{2 \times 1000 \times 60} = 16.67 \text{ [m/s]}$$

$$\text{마찰손실동력 } H = \frac{f P v}{75} = \frac{0.02 \times 750 \times 16.67}{75} = 3.33 \text{ [PS]}$$