

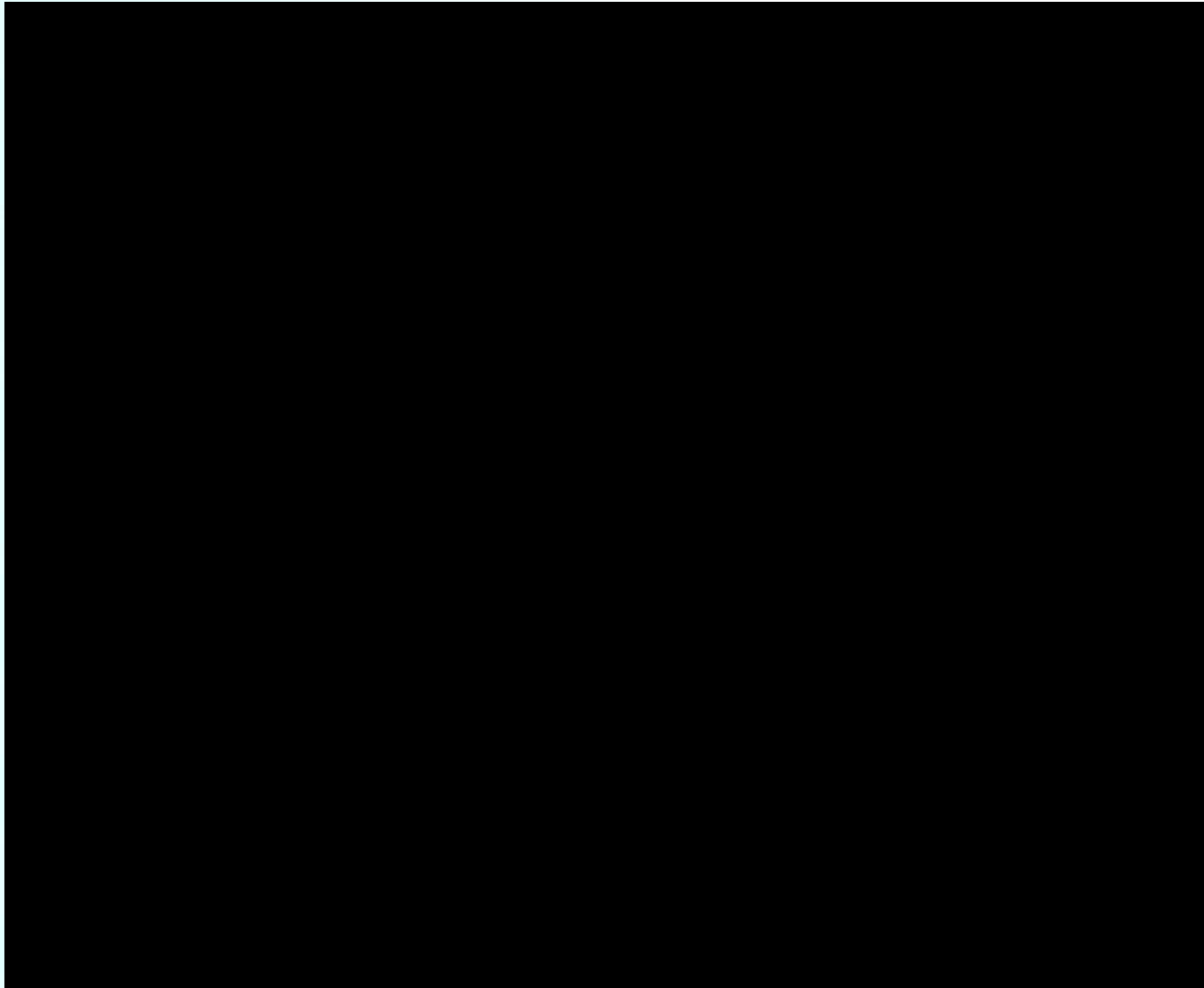
5. Hydraulic Pumps

- Positive & non-positive displacement pumps
- Pumping action of pumps
- Fixed & variable displacement pumps

- Operation of gear, vane, piston pumps ▶
- Flow rate delivered by pumps
- Operation of pressure-compensated pumps

- Efficiency: volumetric, mechanical, overall ▶
- Pump cavitation
- Pump noise: sound intensity levels
- Selection of a pump for a given application ▶

유압 파워 유닛



5.1 Introduction

■ Hydraulic Pump

- the heart of a hydraulic system
- converts mechanical energy into hydraulic energy
- 유압공학에서 다루는 펌프는 **hydrostatic pump**
- 밀어내기식, 용적식 (**positive displacement**) 펌프
- 작동 **cycle**
 - 흡입(빨아들임), 공간차단, 압축 및 토출(밀어냄), 공간차단
- **Displacement** (배제용적)
 - the amount of fluid ejected per revolution
 - unit: cm^3/rev , cc/rev , cm^3/rad , cc/rad

■ 정수압적 유압기기

- 파스칼의 원리를 기초로 하는 유압기기
- 기기내부에서 정압적(**static**) 특성이 지배



5.2 Pumping action of a pump

■ Piston Pump의 작업 Cycle

■ 흡입

- 빨아들임
- 피스톤의 후진에 의하여 만들어지는 공간으로 대기압 상태의 탱크에서 작동유가 빨려 들어가거나, 선행 부스터 펌프에 의하여 가압된 유량이 공급된다.

■ 유로 전환

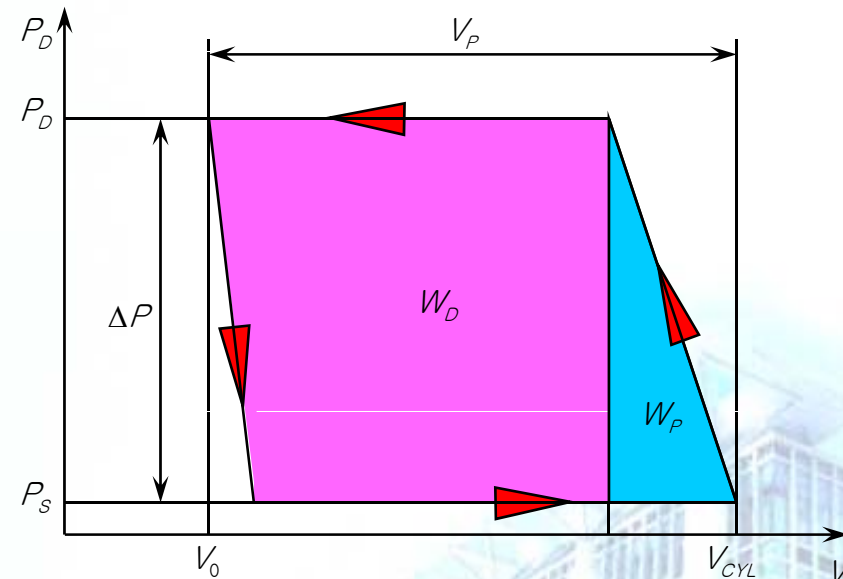
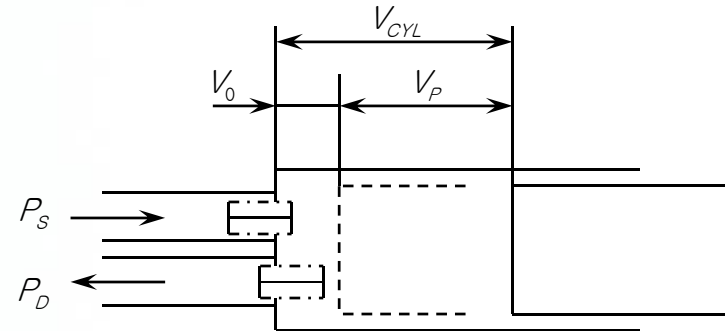
- 흡입 유로 차단 및 토출유로 연결
- 흡입구와 압축실 사이의 유로를 차단하고 토출구와 압축실 사이의 유로를 연결한다.

■ 압축 및 토출

- 밀어냄
- 피스톤의 전진(밀어내기 운동)에 의하여 압축실내의 유압유가 토출구로 밀려 나간다.

■ 유로 전환

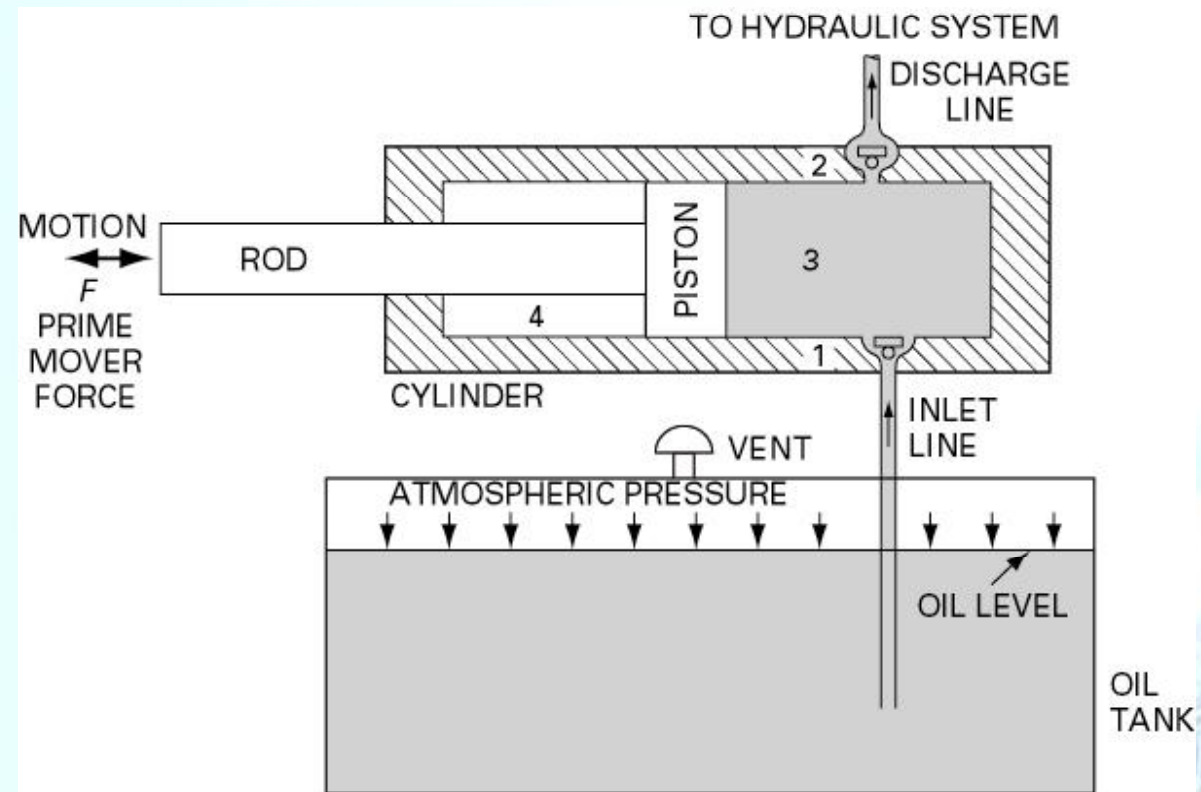
- 토출유로 차단 및 흡입유로 연결
- 토출구와 압축실 사이의 유로를 차단하고 흡입구와 압축실 사이의 유로를 연결한다.



Pumping Theory: piston pump

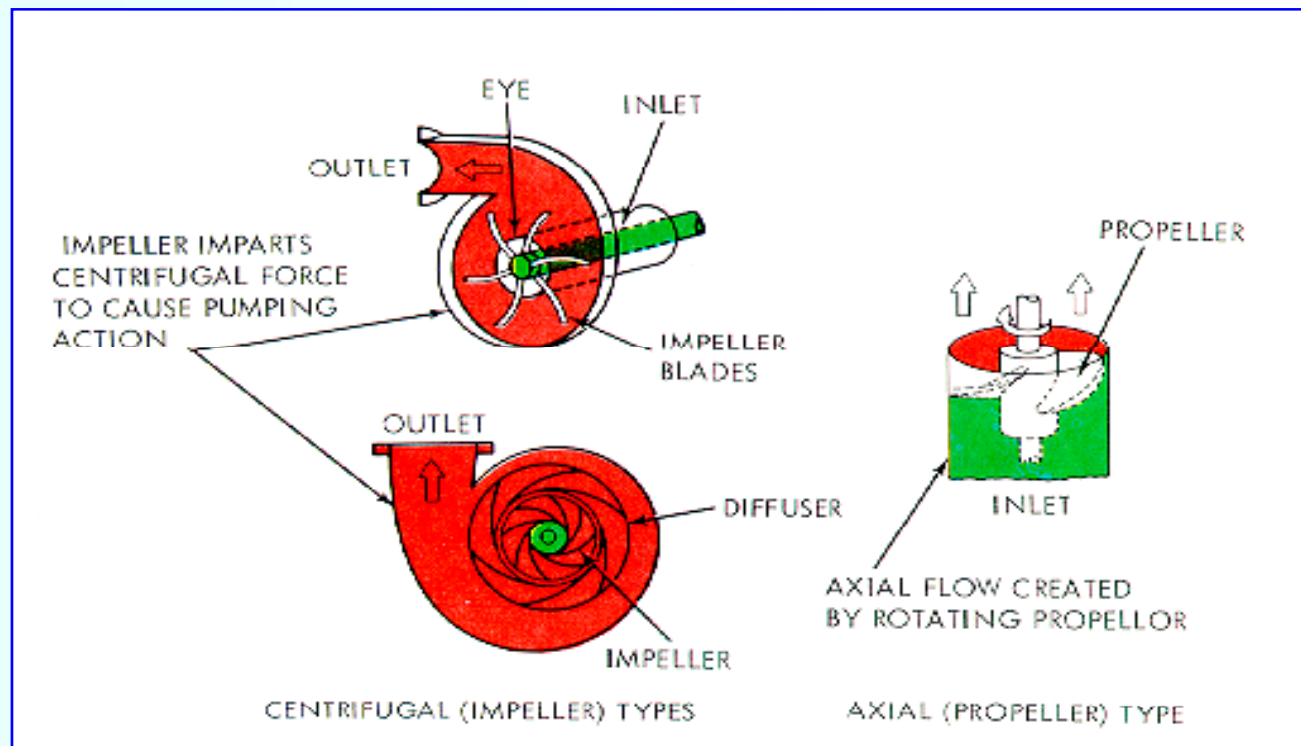
■ Principle

- a partial vacuum is created at the pump inlet due to internal operation of the pump.

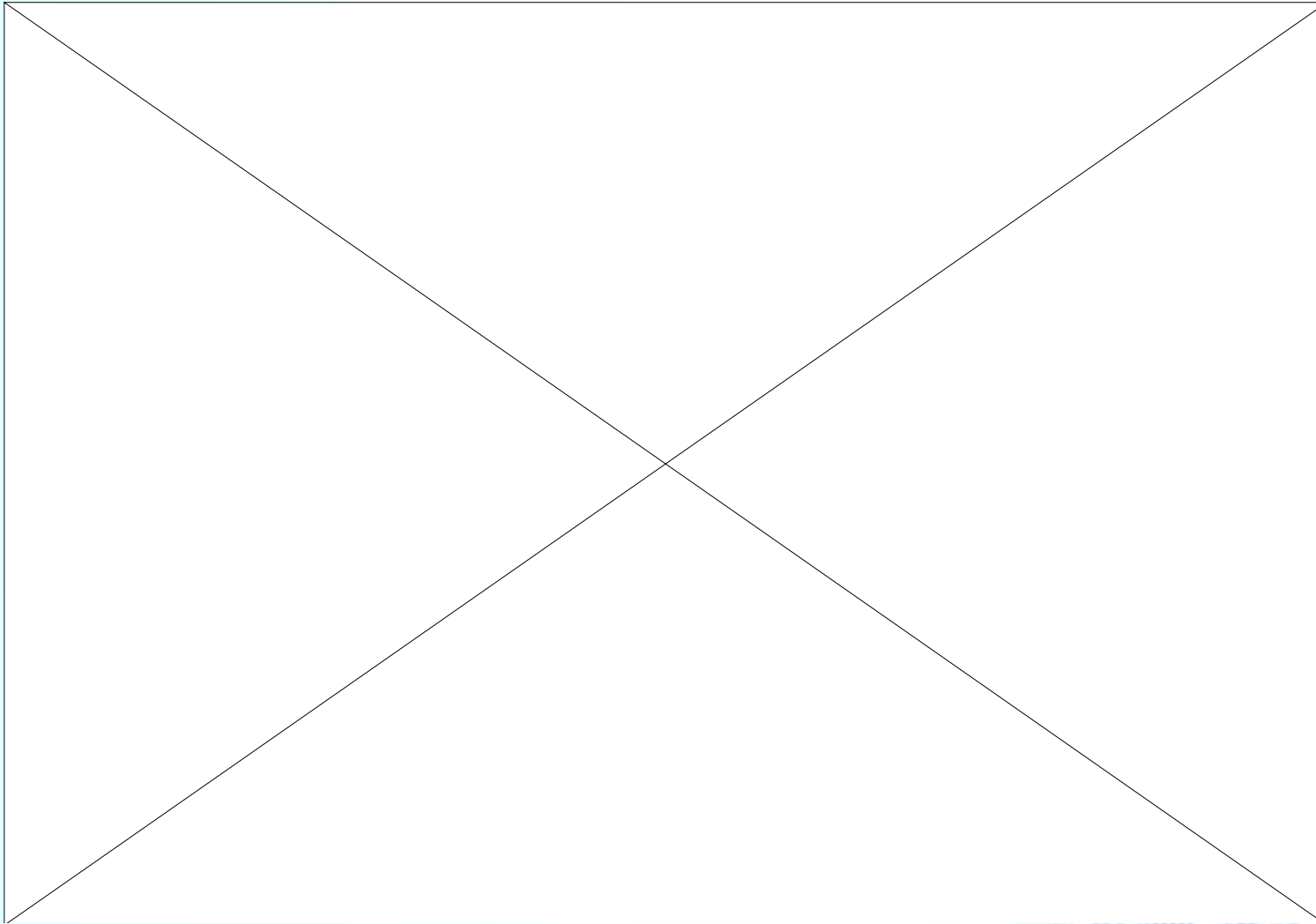


5.3 Non-positive Displacement Pumps

- **Hydrodynamic pump:** 유체의 **velocity energy** 이용
- **용도:** **low-pressure, high-volume flow application**
- **Max. pressure capacity:** **250~300psi**
- **종류:** **Centrifugal (impeller) pump, axial flow (propeller) pump**

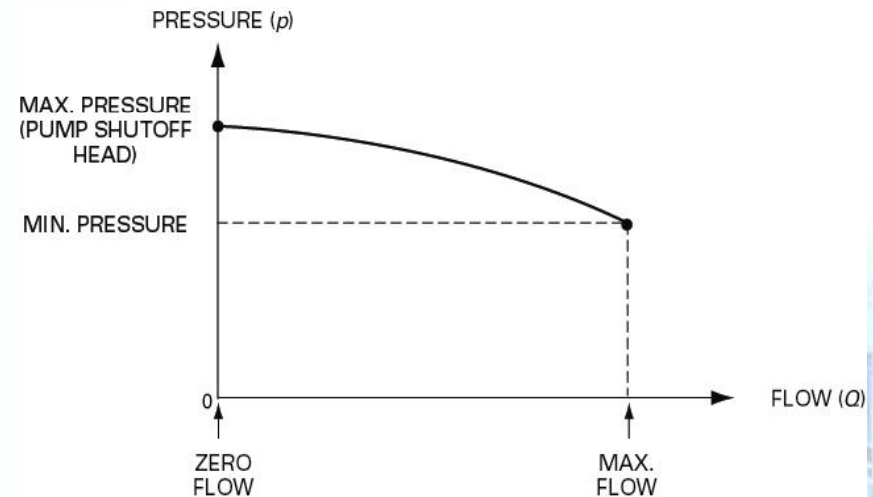
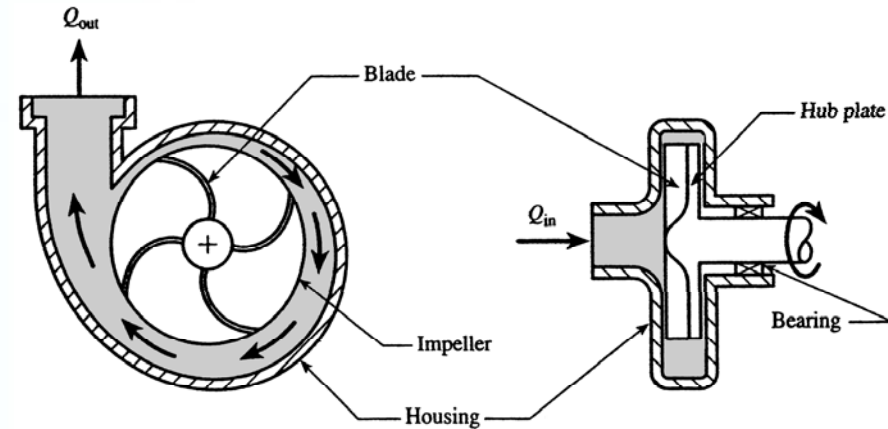


Centrifugal Pump



Centrifugal Pumps

- Flow output is reduced as circuit resistance is increased.
- centrifugal pump can operate even when there is no demand for fluid.
 - no need for a pressure relief valve to prevent pump damage.
- 용도: to deliver water to homes and factories
- Although dynamic pumps provided smooth continuous flow, their output flow rate is reduced as resistance to flow is increased.



Positive Displacement Pumps

- **Hydrostatic pump:** 유체의 **pressure energy** 이용
- **ejects a fixed amount of fluid into the hydraulic system per revolution of pump shaft rotation**
 - pump output flow is constant and not dependent on system pressure.
- **Notice!**
 - Pumps produce fluid flow.
 - Pumps do not pump pressure.
 - The pressure is determined by the resistance to this flow.
 - The pressure will rise until some component breaks unless pressure relief is provided.
- **pumps must be protected against overpressure**
 - pressure relief valve

Positive Displacement Pumps

- **Advantages over non-positive displacement pumps**
 - High-pressure capability: up to 12,000psi (800bar)
 - Small, compact size
 - High volumetric efficiency
 - Small changes in efficiency throughout the design pressure range
 - Great flexibility of performance: wide range of pressure & speed

- **Gear pumps**
 - External gear pumps
 - Internal gear pumps
 - Lobe pumps
 - Screw pumps

- **Vane pumps**
 - Unbalanced vane pumps
 - Balanced vane pumps

- **Piston pumps**
 - Axial piston pumps
 - Radial piston pumps

Fixed & Variable Displacement Pumps

■ Fixed displacement pumps

- the amount of fluid ejected per revolution cannot be varied.

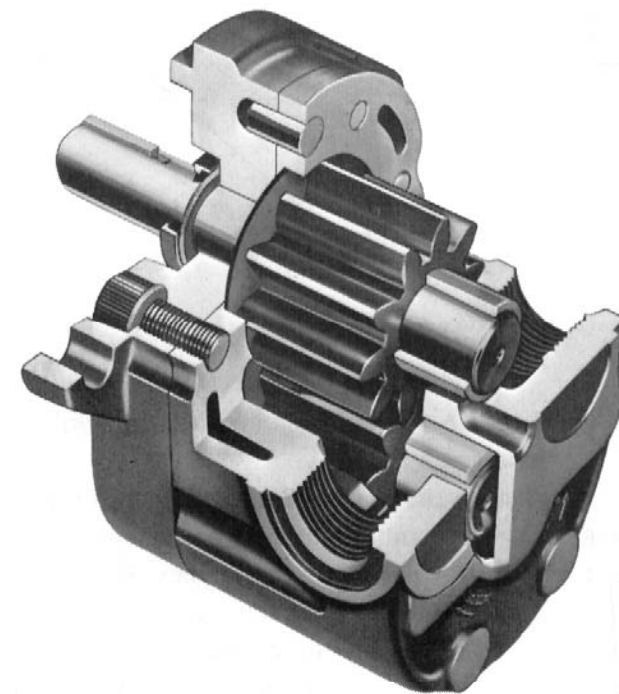
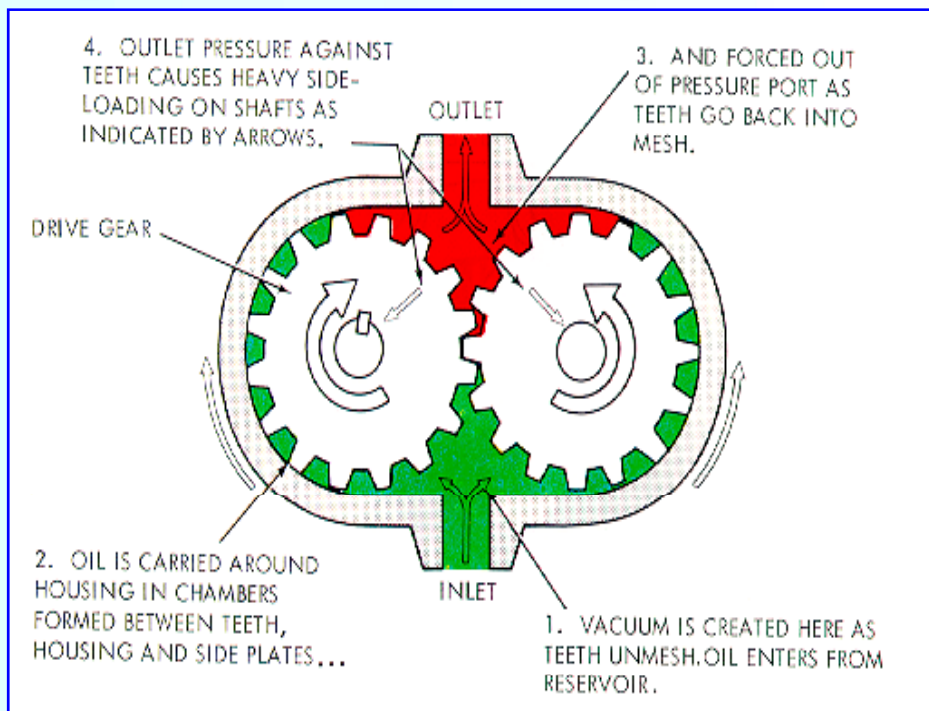
■ Variable displacement pumps

- the displacement can be varied by changing the physical relationships of various pump elements.
- this change in pump displacement produces a change in pump flow output even though pump speed remains constant.
- vane pump, piston pump
- gear pump: fixed displacement only by geometrical necessity.

5.4 Gear Pumps

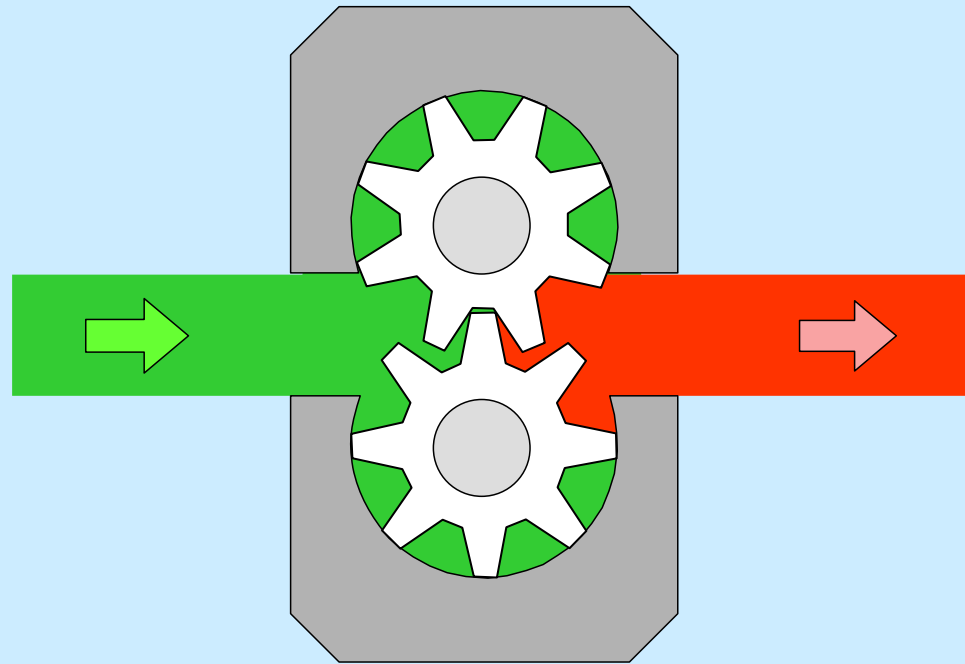
■ External Gear Pump

- fixed displacement pump
- uses spur gear (teeth are parallel to the axis of the gear)
- are noisy at relatively high speeds



External Gear Pump

EXTERNAL GEAR PUMP



End

Pause / Restart

Theoretical Flow Rate

Volumetric displacement

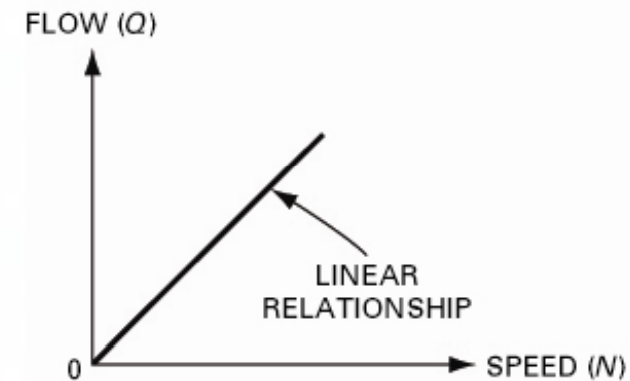
$$V_D = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) L$$

Theoretical flow rate

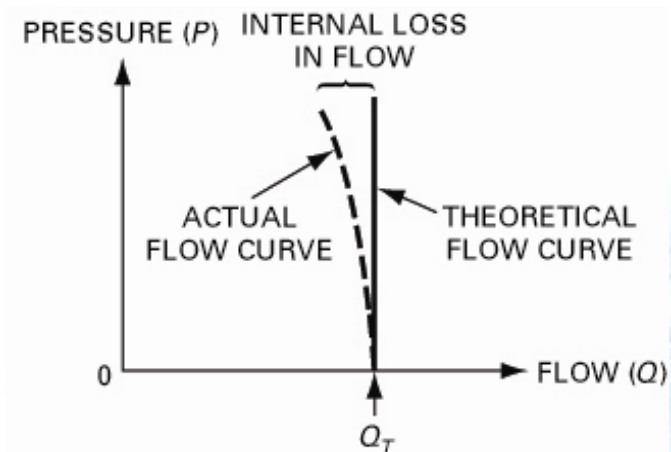
$$Q_T (m^3 / \text{min}) = V_D (m^3 / \text{rev}) \times N (\text{rev} / \text{min})$$

Volumetric efficiency

$$\eta_v = \frac{Q_A}{Q_T} \times 100$$



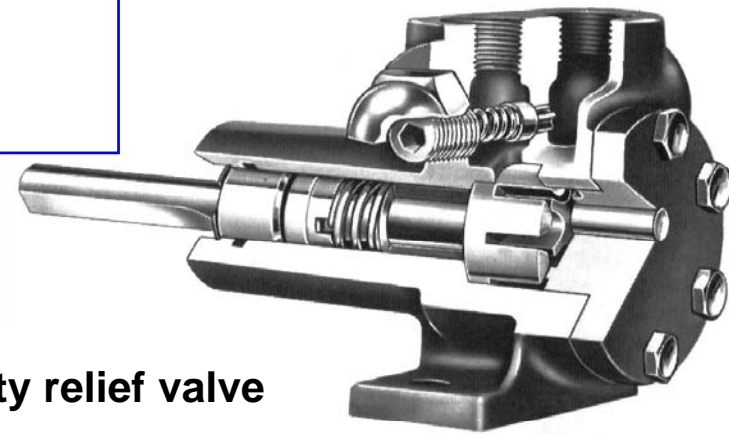
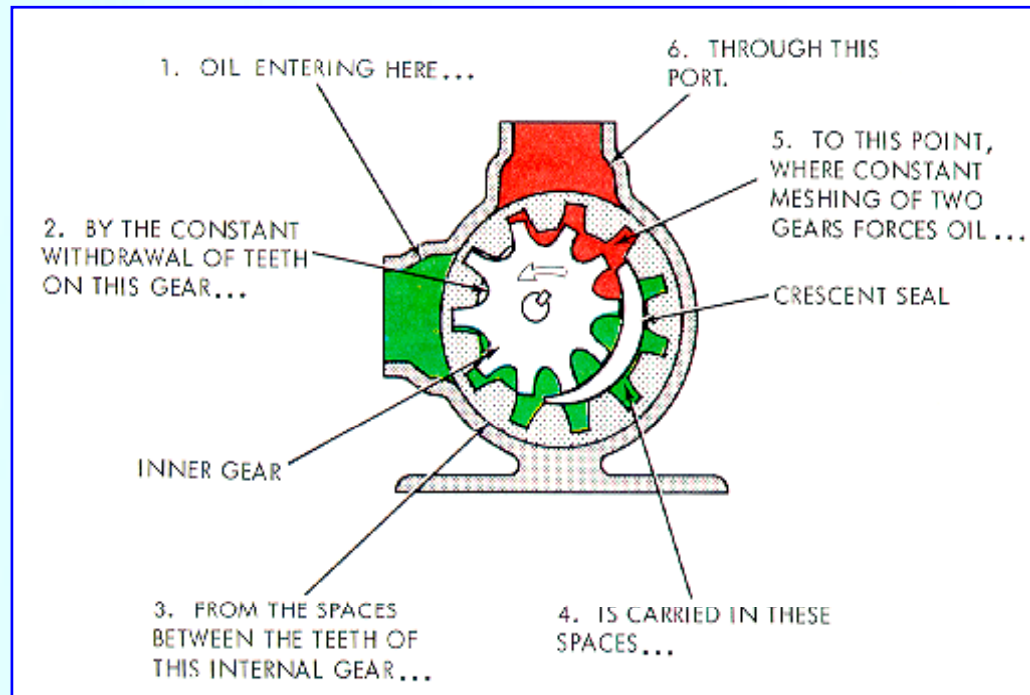
(a) FLOW VERSUS SPEED CURVE



(b) FLOW VERSUS PRESSURE CURVE AT CONSTANT PUMP SPEED

Internal Gear Pump

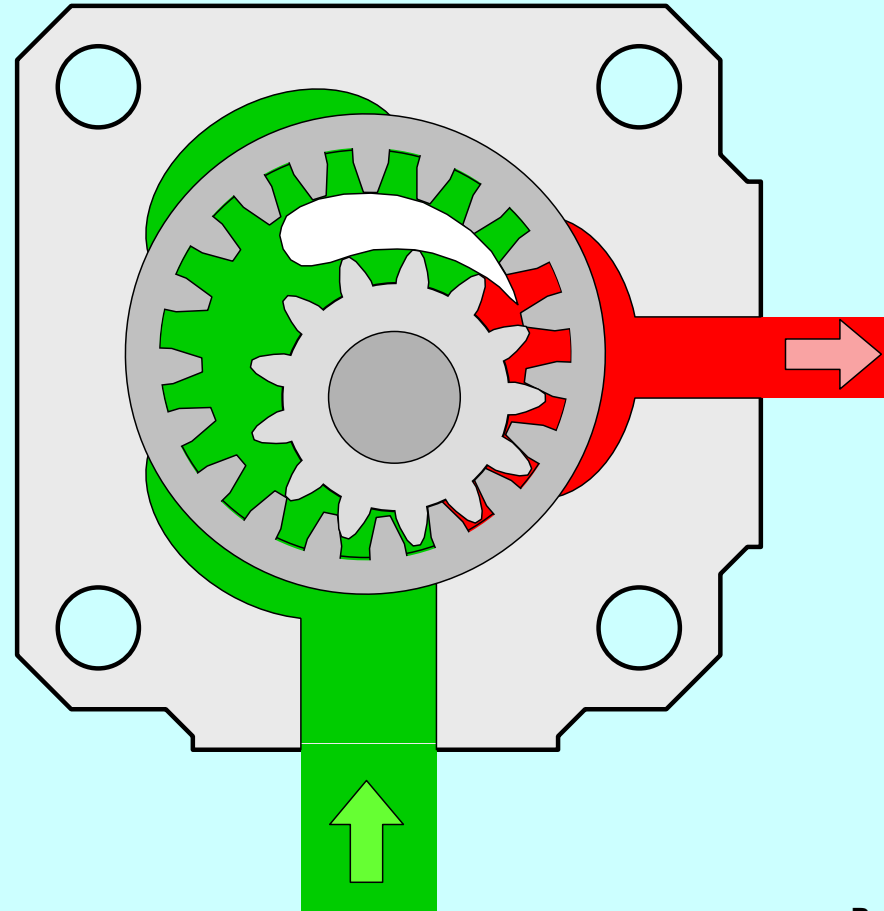
■ Crescent Seal Type



❖ Internal gear pump with built-in safety relief valve

Internal Gear Pump

INTERNAL GEAR PUMP

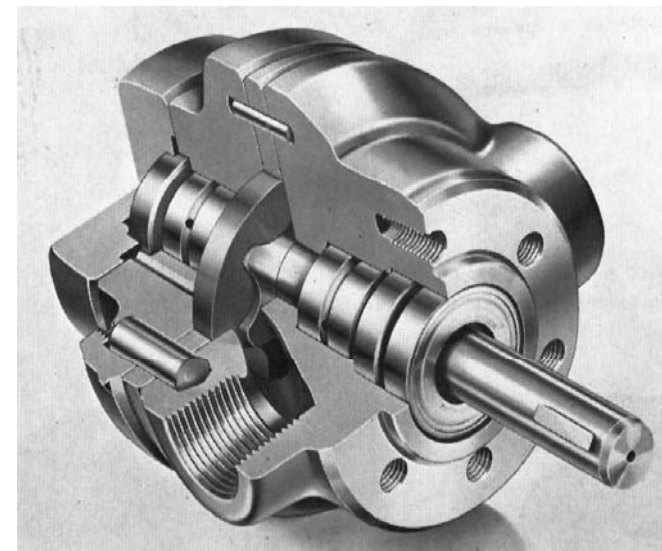
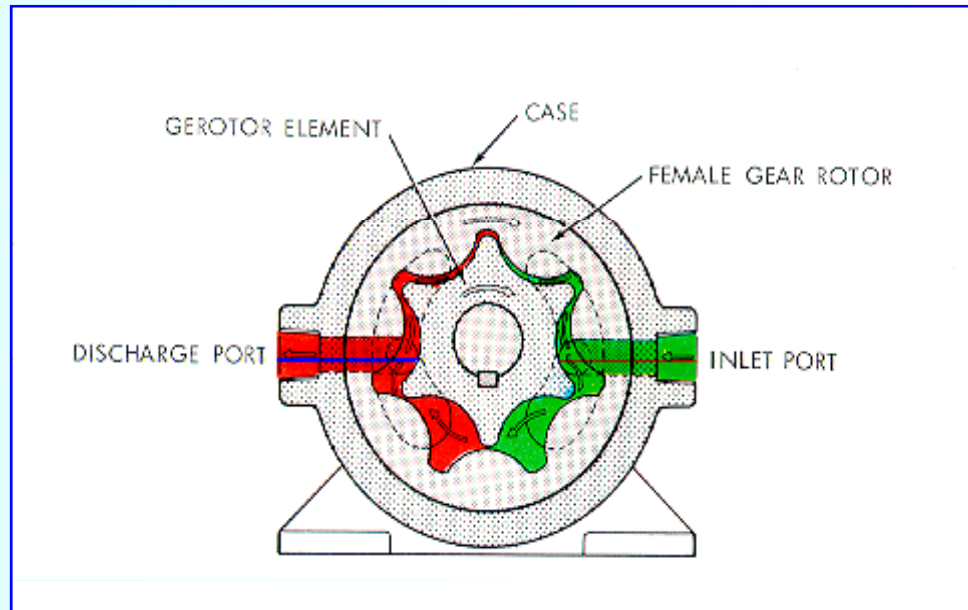


End

Pause / Restart

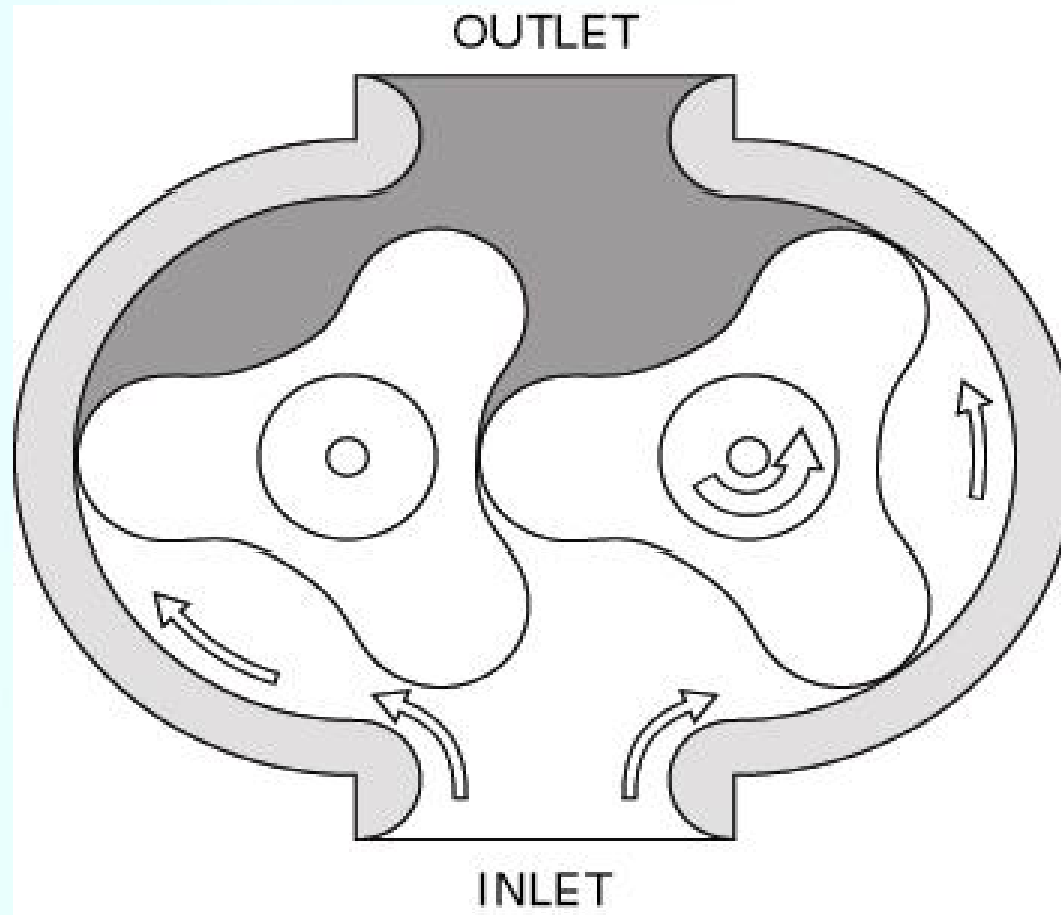
Internal Gear Pump

■ Gerotor Pump



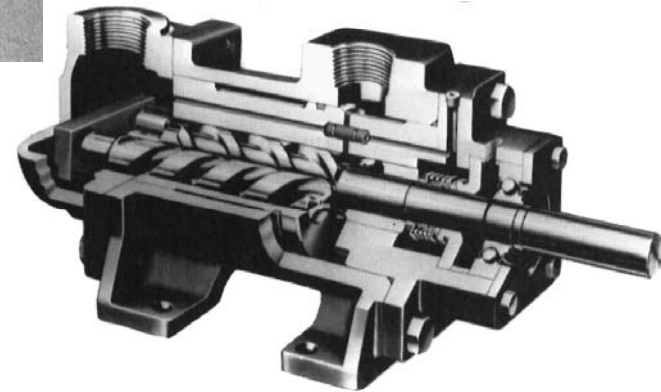
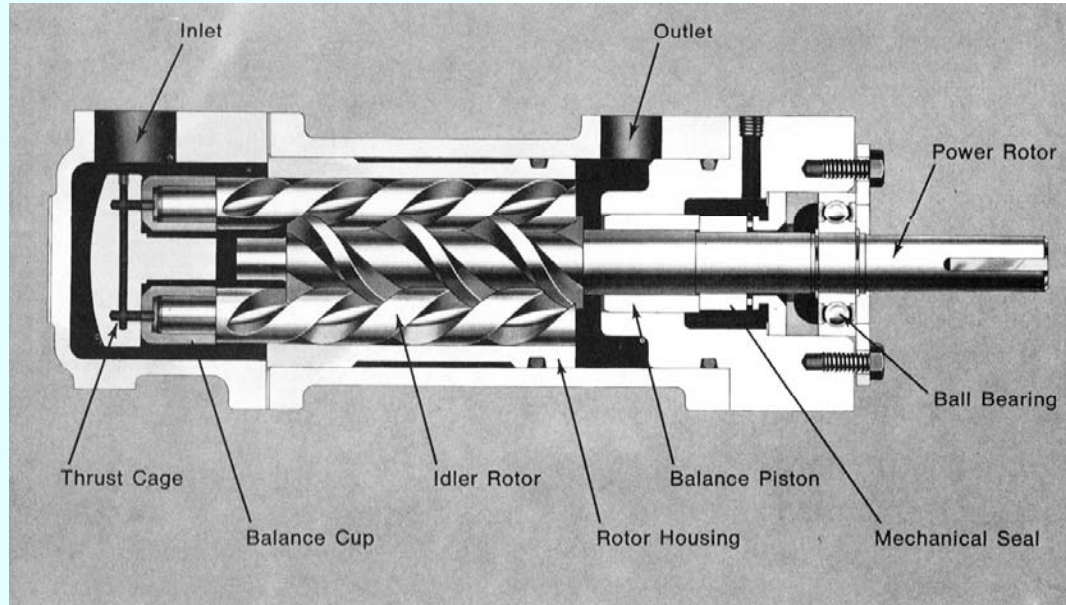
Internal Gear Pump

■ Lobe Pump



Screw Pump

■ Screw Pump



기어 펌프, 나사 펌프 특징

■ External gear pump

- 구동기어와 종동기어가 서로 외접
- 인벌류트 치형의 기어 사용
- 보통 **100bar** 이내의 압력에서 사용
- **210bar**까지도 사용 가능
- 진동, 소음이 발생하기 쉬움
- 압력 분포의 불균형 문제 발생
- 정용량형만 가능
- 고부하, 고회전수, 고온에서는 사용 불가
- 용량 증대를 위해서는 치폭을 증가. 대신 베어링 부하가 커짐

■ Internal gear pump

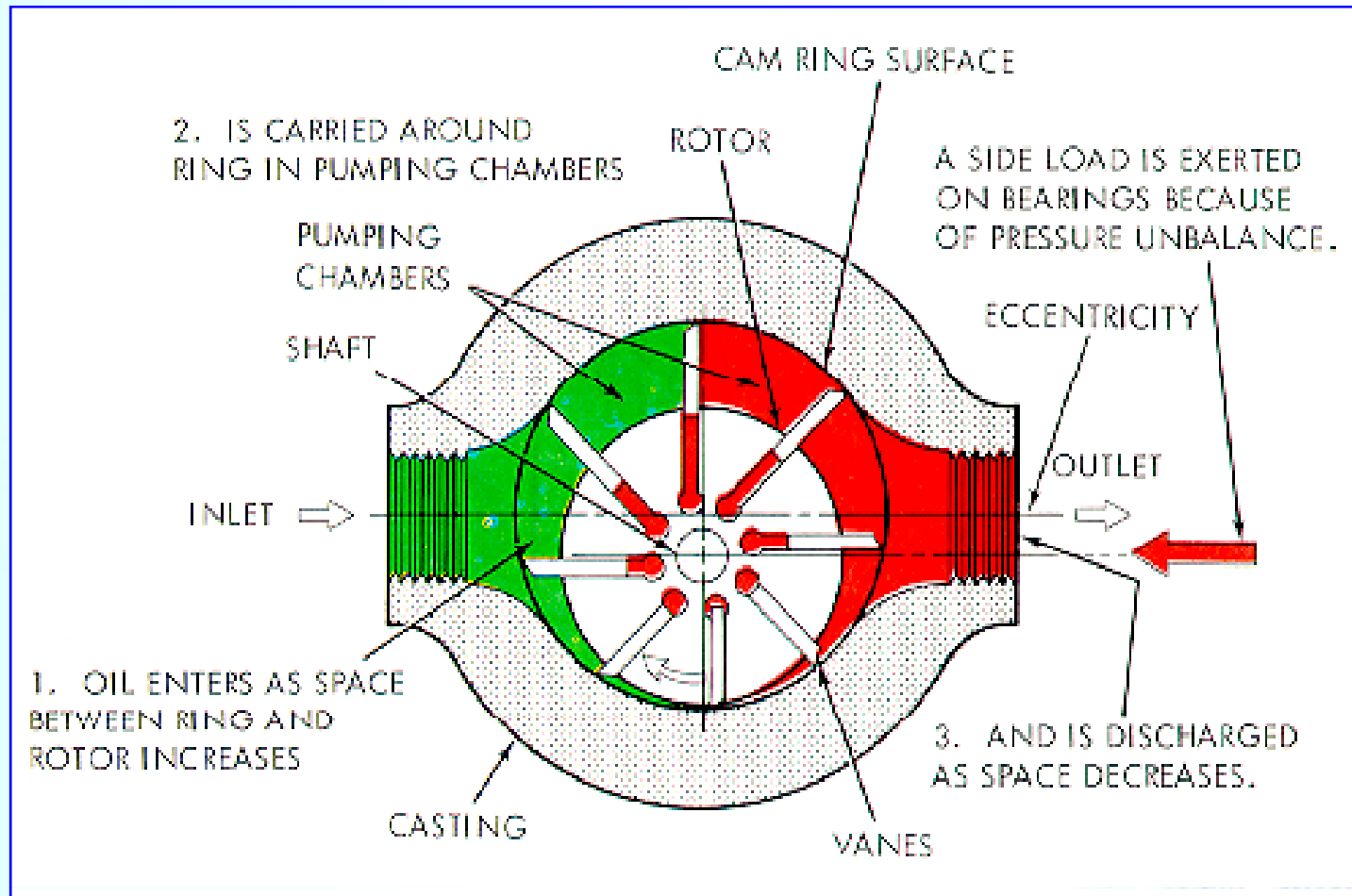
- 외접형에 비해 흐름의 맥동이 적음
- 내외의 양 기어의 상대속도가 작으므로 고속회전에 용이
- **140bar** 이하에서 사용
- **210bar**까지도 사용 가능

■ Screw pump

- 구조상 송출류가 완전한 **smooth flow**를 이룸
- 진동이나 소음이 적음
- 마찰력이 크고, 비교적 효율이 낮다.
- 정용량형 펌프만 가능
- **70bar** 이내의 압력에서 사용

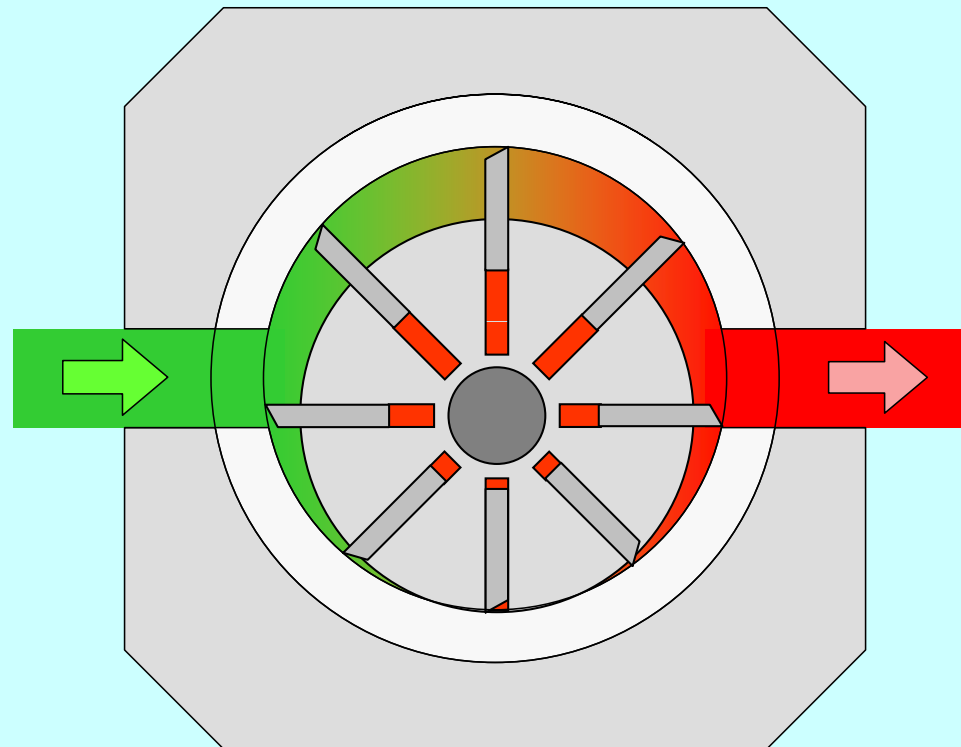
5.5 Vane Pumps

■ Vane pump operation



Simple Vane Pump

SIMPLE VANE PUMP



End

Pause / Restart

Analysis of Volumetric Displacement

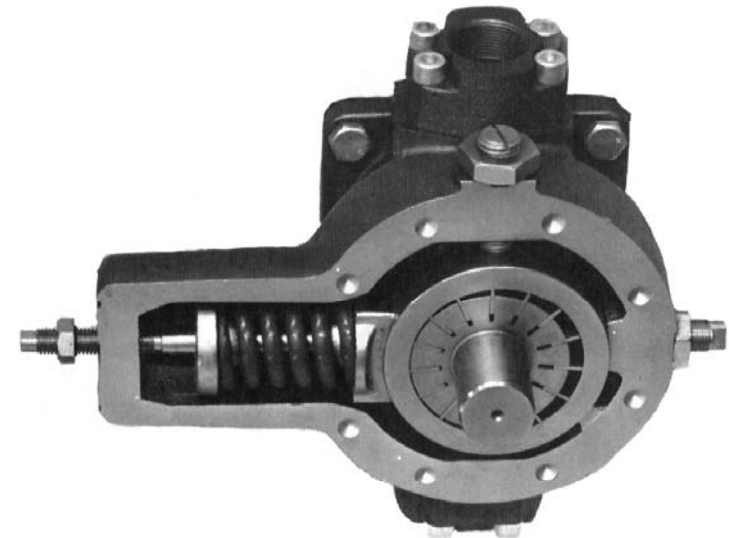
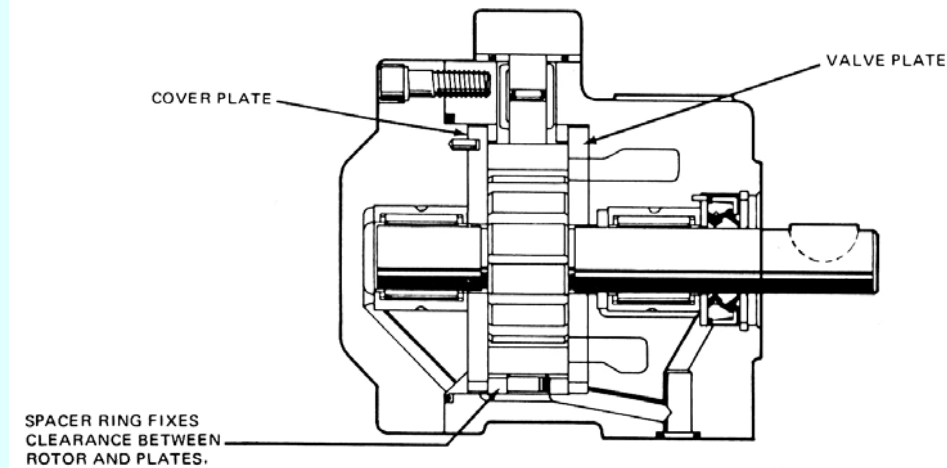
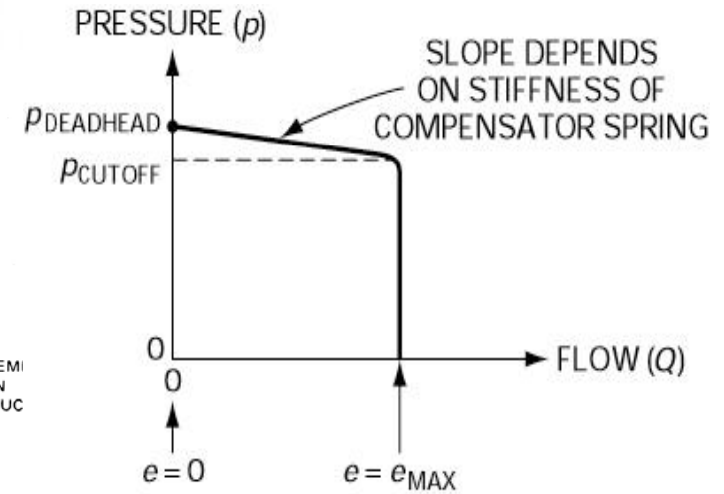
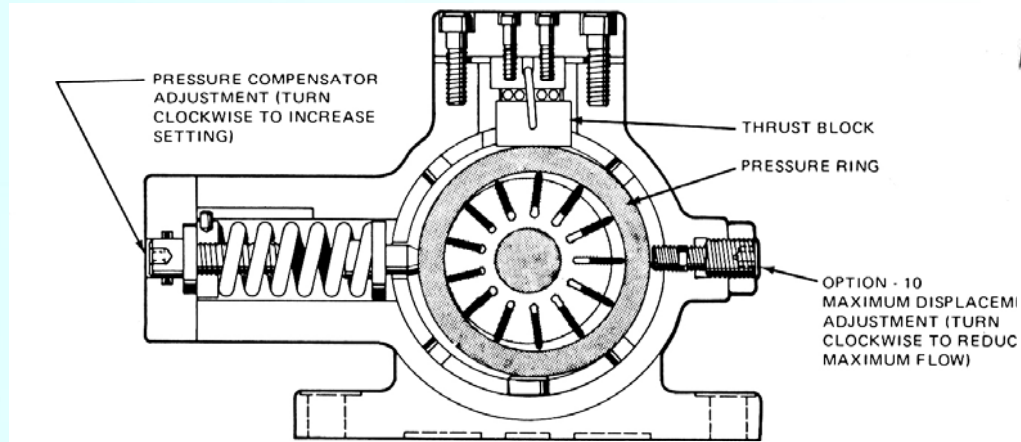
- D_C : diameter of cam ring (in, m)
- D_R : diameter of rotor (in, m)
- L : width of rotor (in, m)
- V_D : pump volumetric displacement (in^3 , m^3)
- e : eccentricity (in, m)
- e_{\max} : max. possible eccentricity (in, m)
- $V_{D_{\max}}$: max. possible volumetric displacement (in^3 , m^3)

$$e_{\max} = \frac{D_C - D_R}{2}$$

$$V_{D_{\max}} = \frac{\pi}{4} (D_C^2 - D_R^2) L = \frac{\pi}{4} (D_C + D_R)(D_C - D_R) L = \frac{\pi}{4} (D_C + D_R)(2e_{\max}) L$$

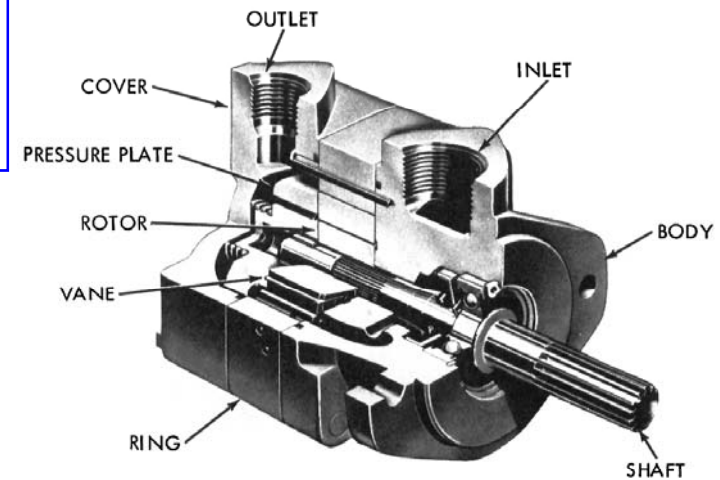
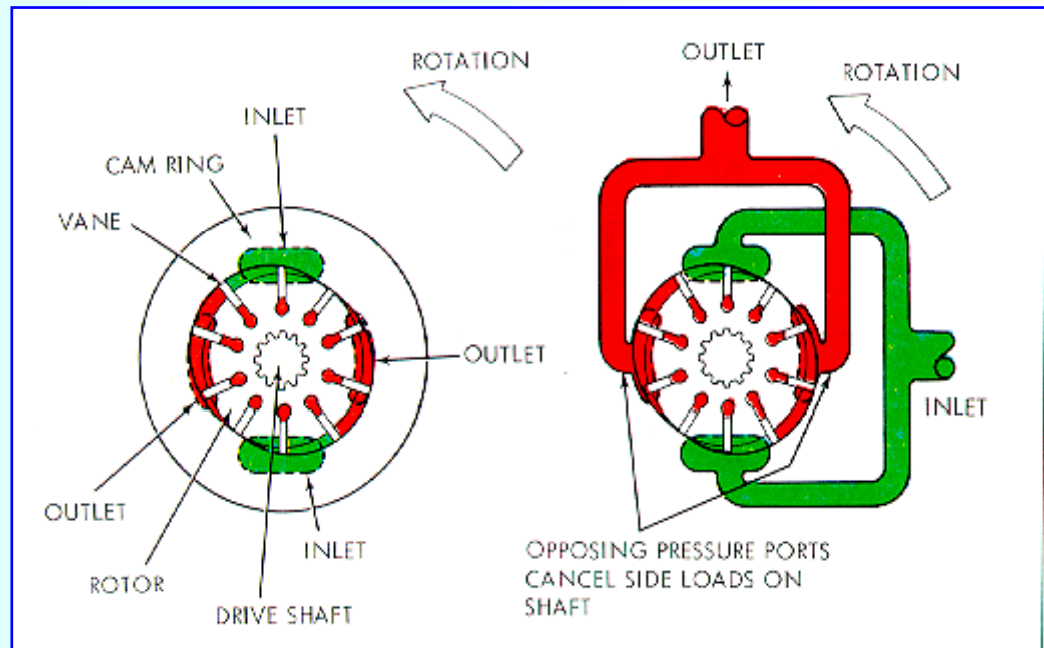
$$V_D = \frac{\pi}{2} (D_C + D_R) e L$$

Pressure-Compensated Vane Pump



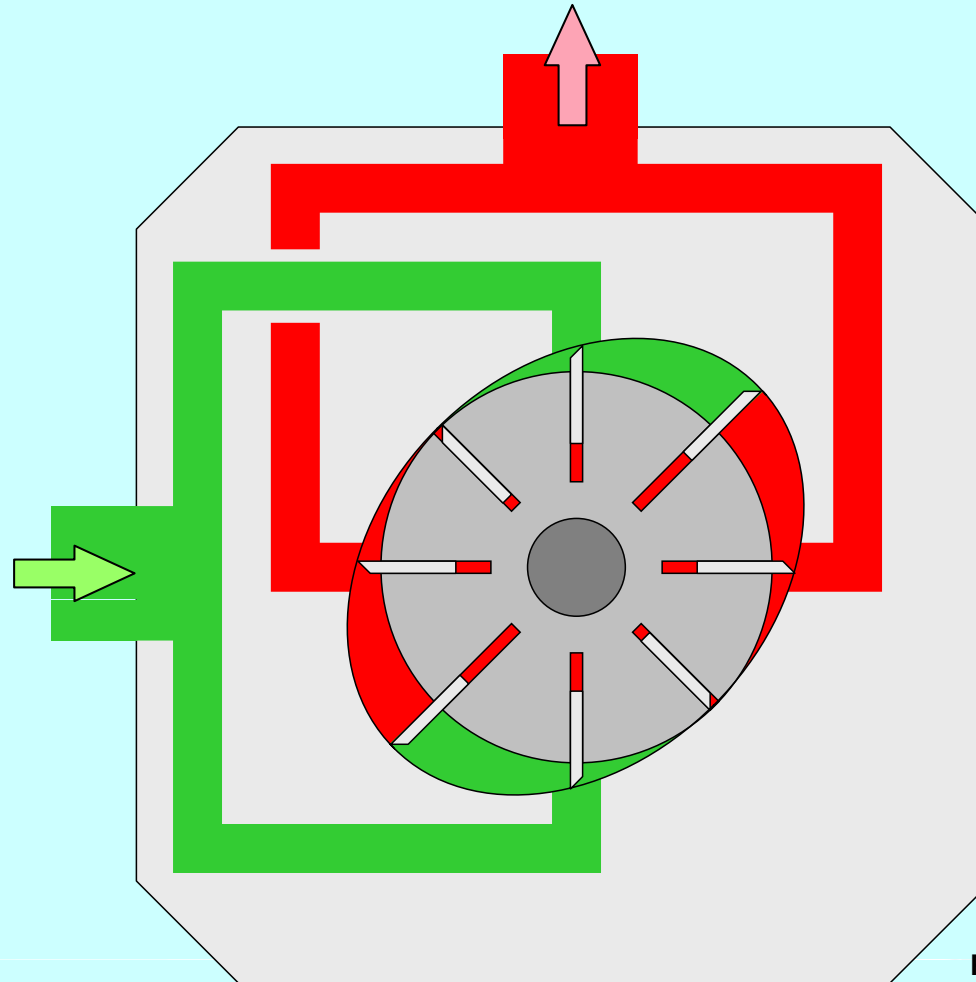
Vane Pump

■ Balanced vane pump principles



Balanced Vane Pump

BALANCED VANE PUMP



End Esc

Pause / Restart S

베인 펌프의 특징

■ Vane pump 장점

- 송출 압력의 맥동이 적음
- **vane**의 마모에 의한 압력 저하가 발생하지 않음
- 펌프의 유동력에 비해 형상 치수가 작음
- 고장이 적고 보수가 용이

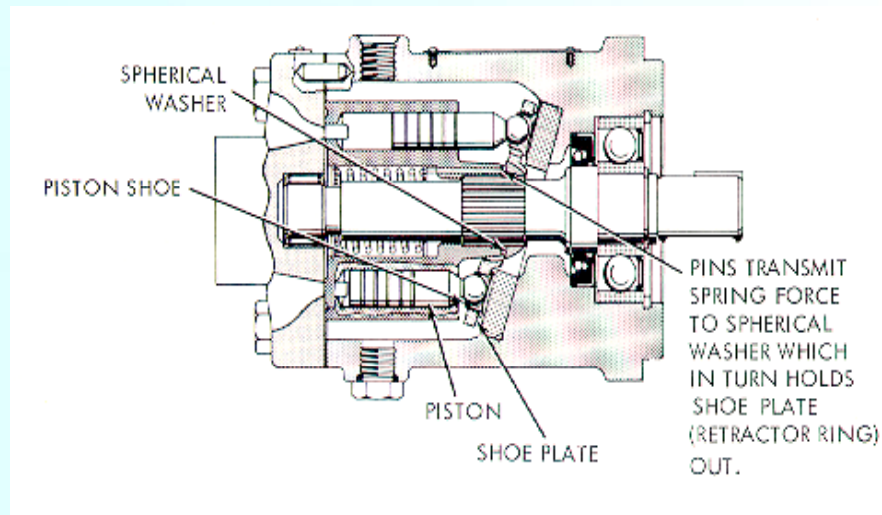
■ Vane pump 단점

- 제작시 정밀도가 요구됨
- 유압유의 점도에 제한
 - 일반적으로 38°C에서 150~300 SUS
- 오일의 보수에 주의가 필요

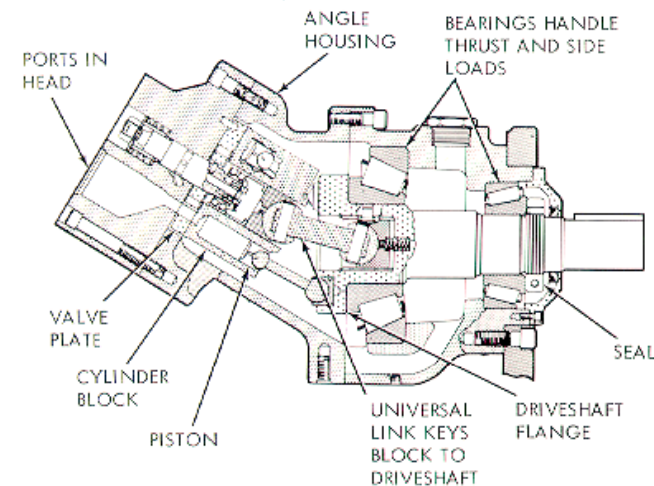
5.6 Piston Pumps

■ Axial Piston Pump

- **Swash plate design (사판식)** : 사판의 각도(사판각)에 의하여 피스톤을 축방향으로 구동
- **Bent axis design (사축식)** : 2 축의 기울어진 각도(사축각)에 의하여 피스톤을 축방향으로 구동

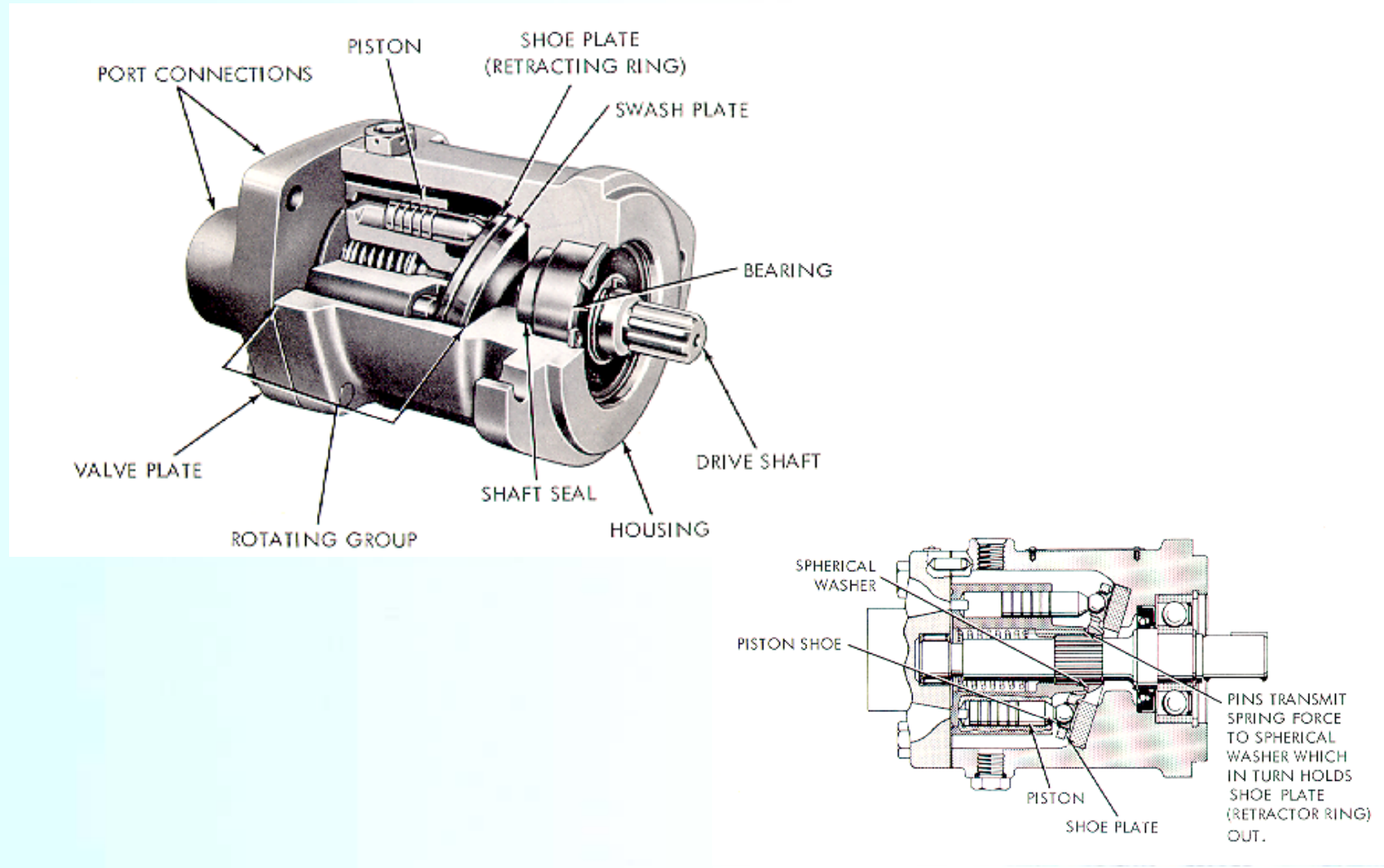


사판식



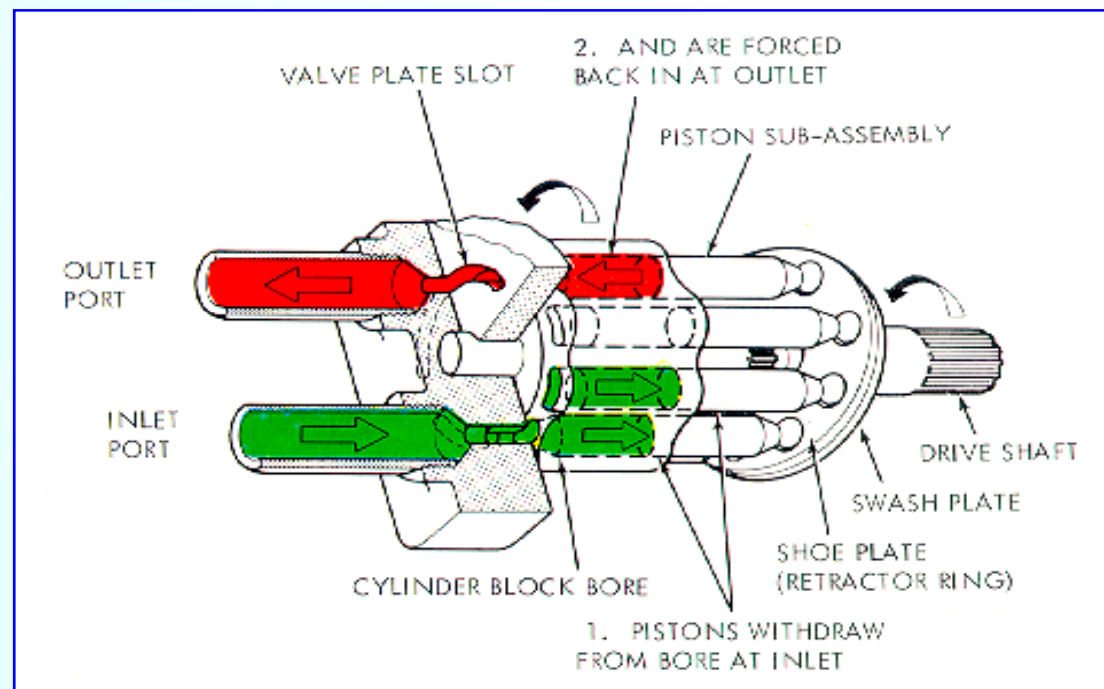
사축식

Swash Plate Type Piston Pump



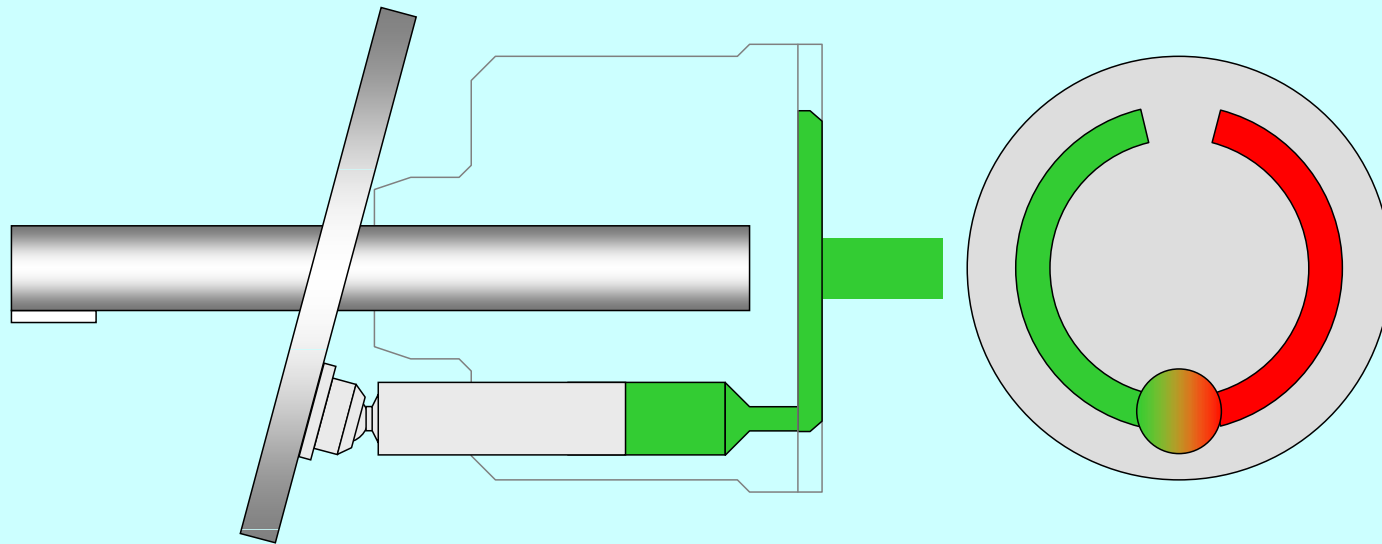
Operation of Swash Plate Type Piston Pump

- 축, CYLINDER BLOCK, PISTON 등이 회전
- 밸브판(VALVE PLATE), 사판(SWASH PLATE)은 고정
- SHOE PLATE에 의해 PISTON SHOE는 사판에 밀착
 - 축이 회전하게 되면 PISTON은 사판 위를 따라 미끄러지며, 실린더 블록의 실린더 내에서 축방향으로 왕복운동을 한다.



Piston Pump Principle

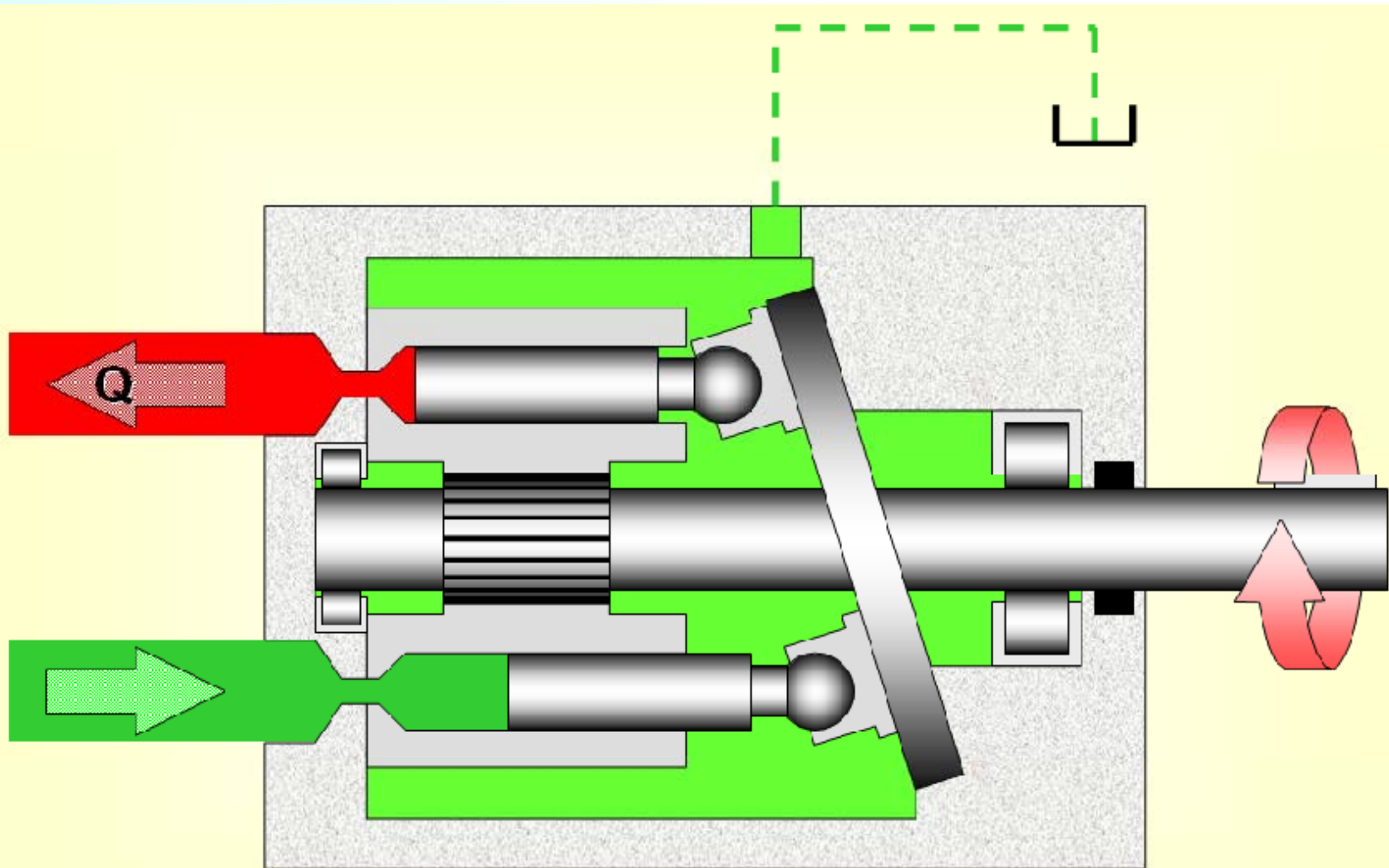
PISTON PUMP PRINCIPLE



End

Pause / Restart

펌프 토출량 (Fixed Displacement Pump)



$$Q = (\text{No. of Pistons}) \times (\text{Piston Size}) \times (\text{Piston Stroke}) \times (\text{Drive Speed})$$

Displacement of Swash Plate Type Piston Pump

펌프의 배제용적(displacement)이란?

- 단위 회전당 토출하는 체적(이론)
- 토출량 / 회전속도 (실험): 최소 토출압력, 정격 회전속도 조건

$$V_P = \frac{1}{4} \pi D_P^2 D_{CYL} \tan \alpha Z_P$$

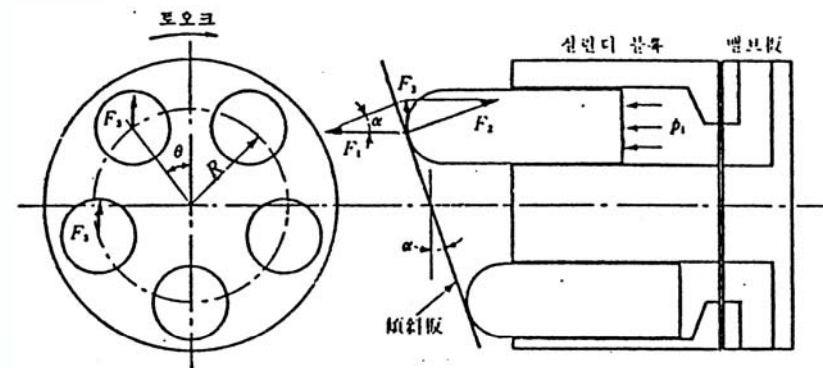
V_P : 1회전당토출유량(cm^3 / rev)

D_P : piston 직경(cm)

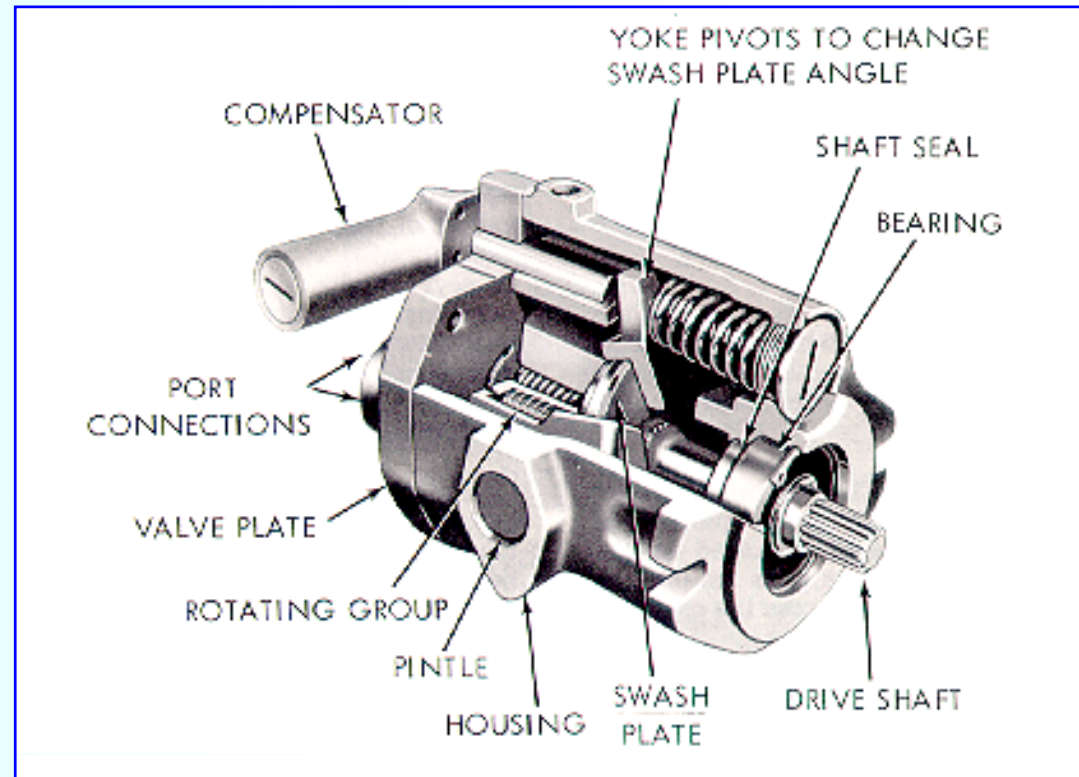
D_{CYL} : cylinder block piston 직경(cm)

α : 사판 경사각

Z_P : piston 수량

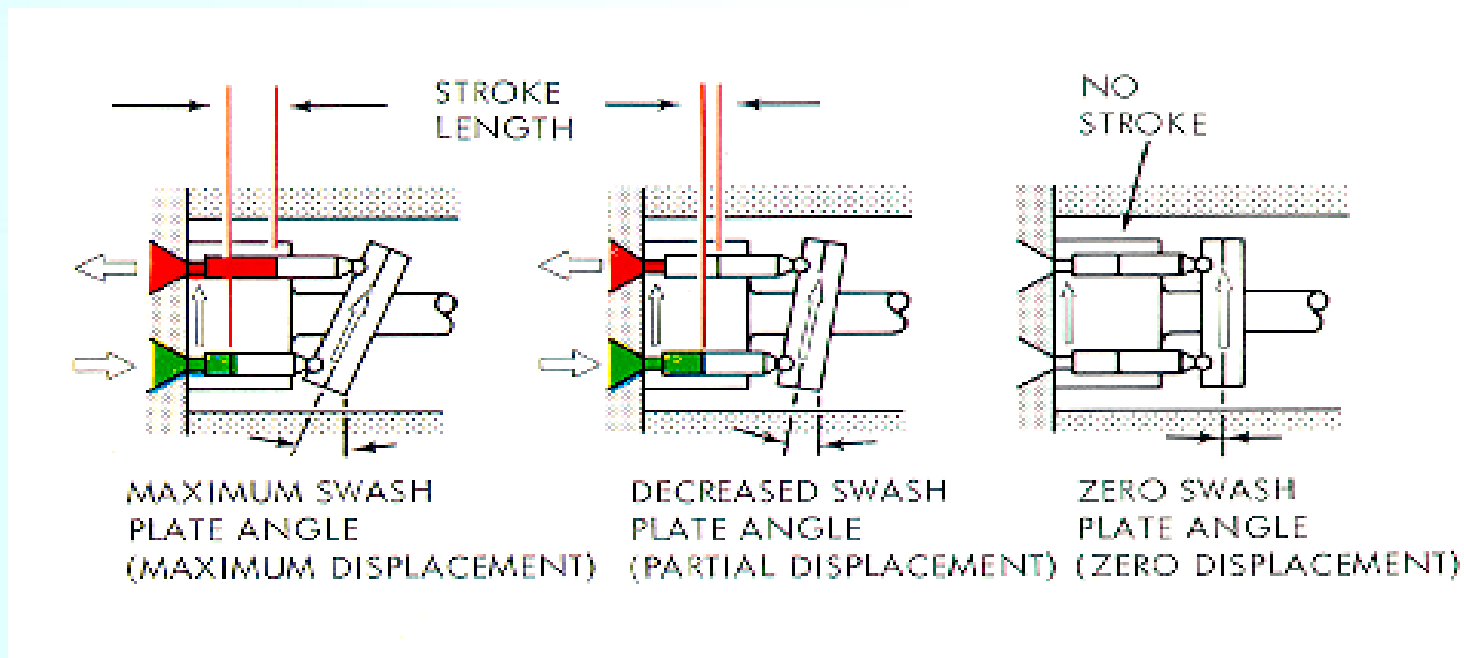


Variable Displacement Version of Piston Pump

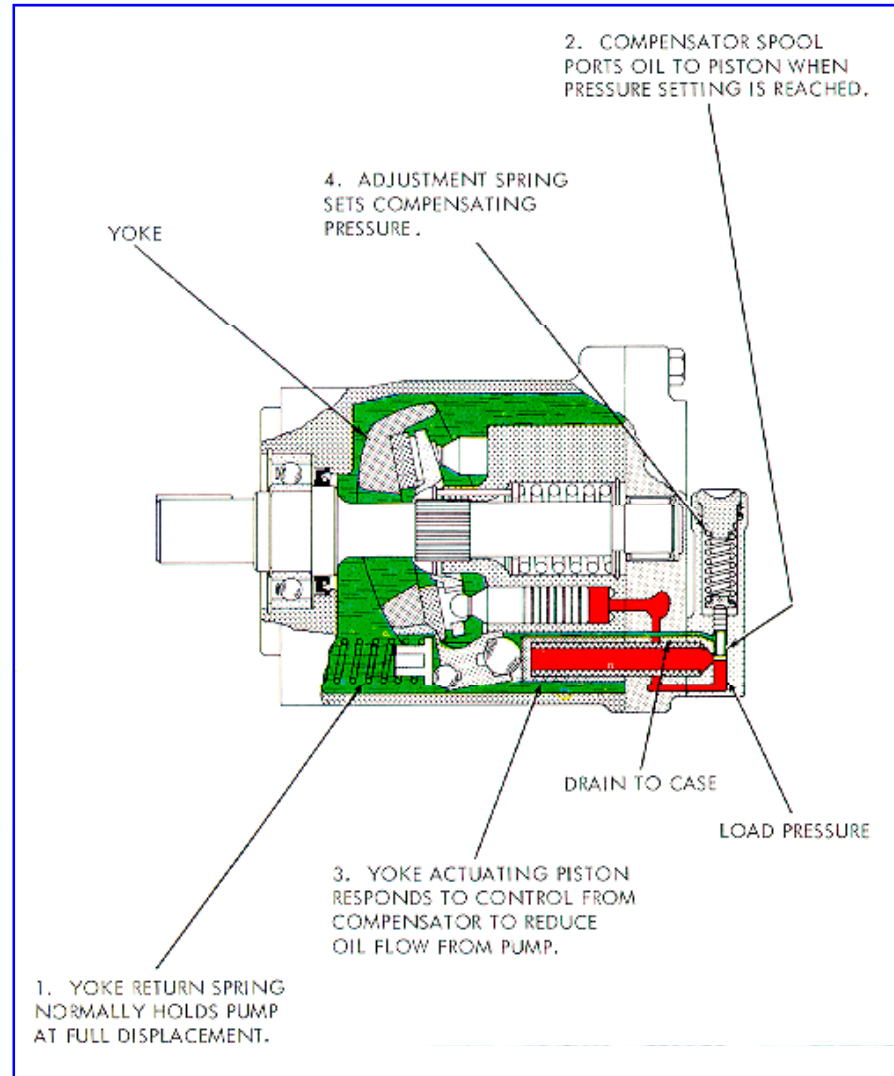
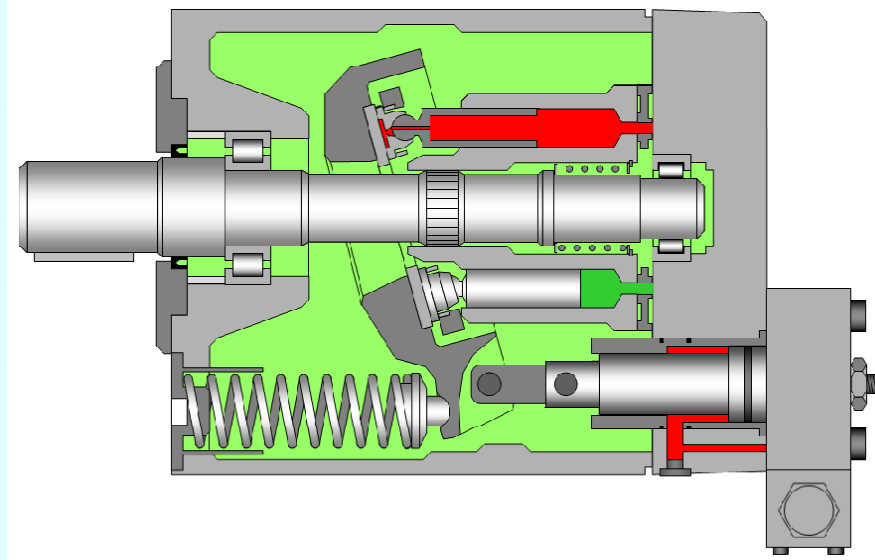


Operation of Variable Displacement Piston Pump

- 가변 용량 펌프(Variable displacement pump)
 - 사판 또는 사축의 기울어진 각도를 제어
- 정용량 펌프(Fixed displacement pump)
 - 사판 또는 사축의 기울어진 각도가 고정



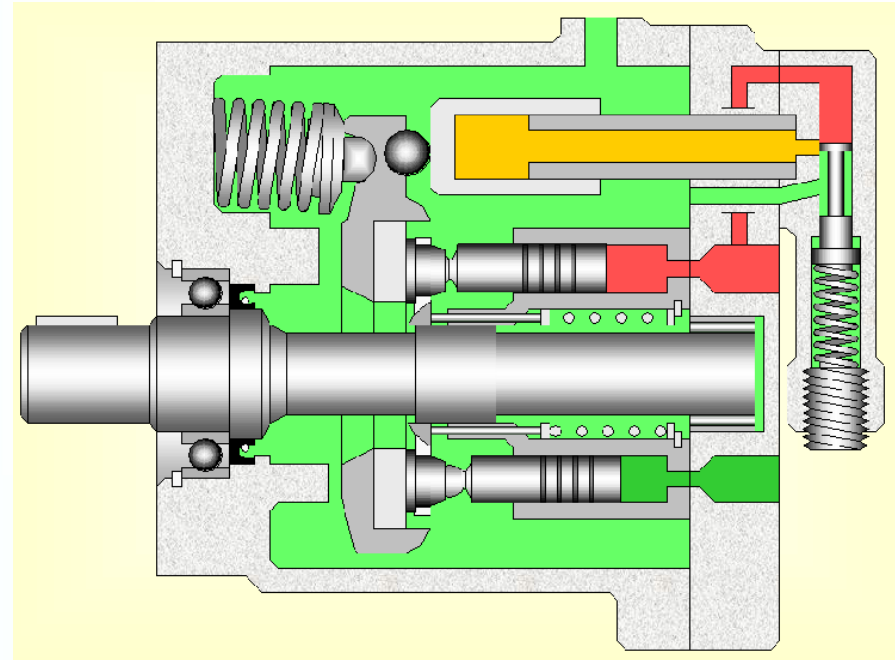
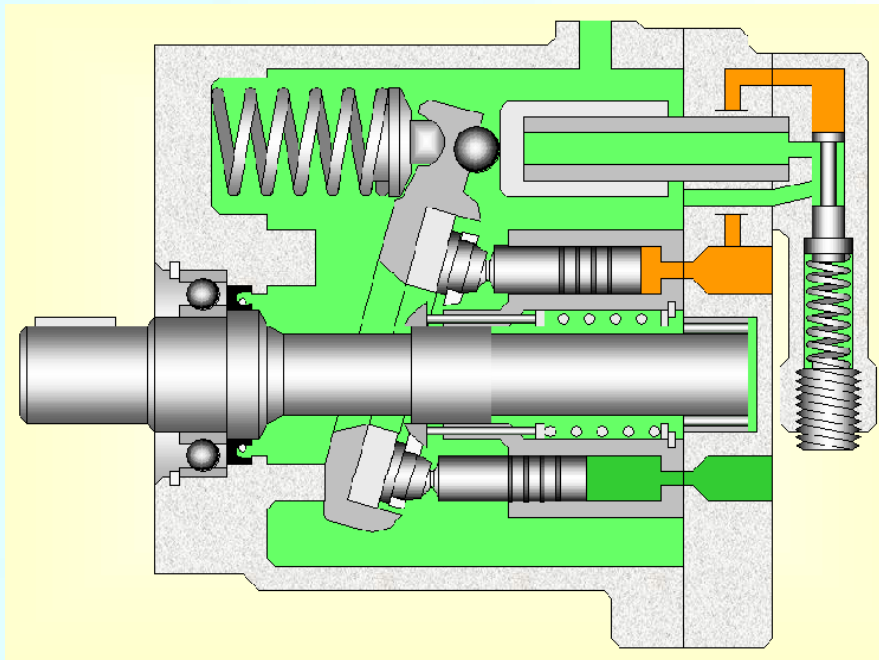
Pressure-Compensated Piston Pump



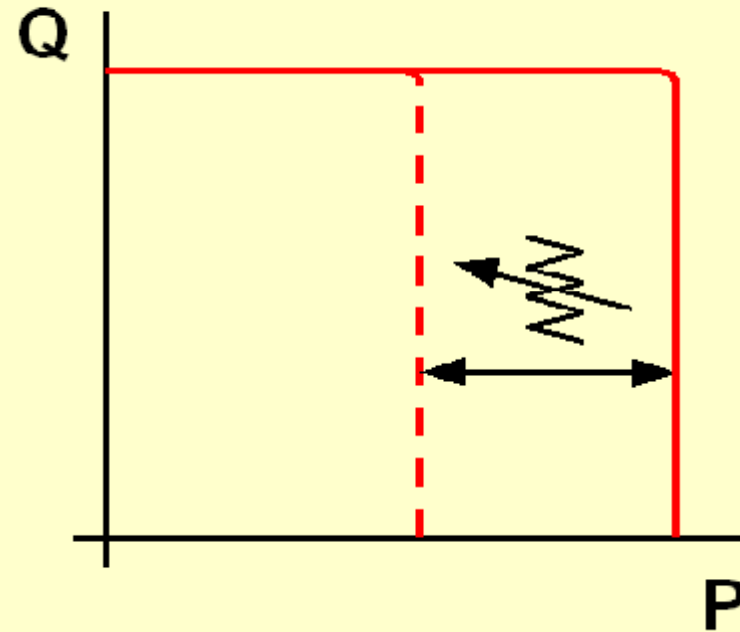
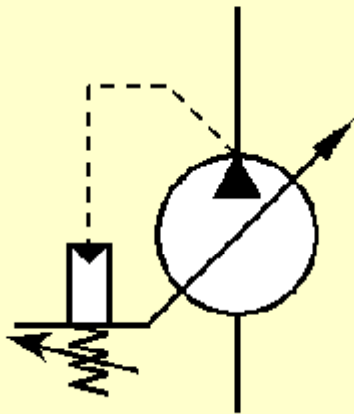
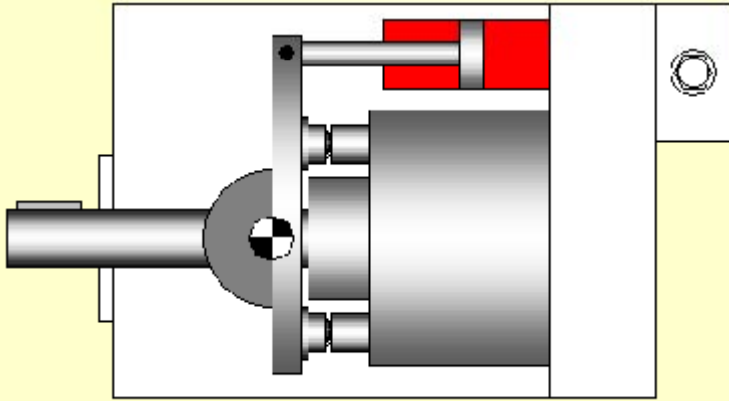
Operation of Pressure Compensated Pump

■ Maximum Flow

■ Zero Flow

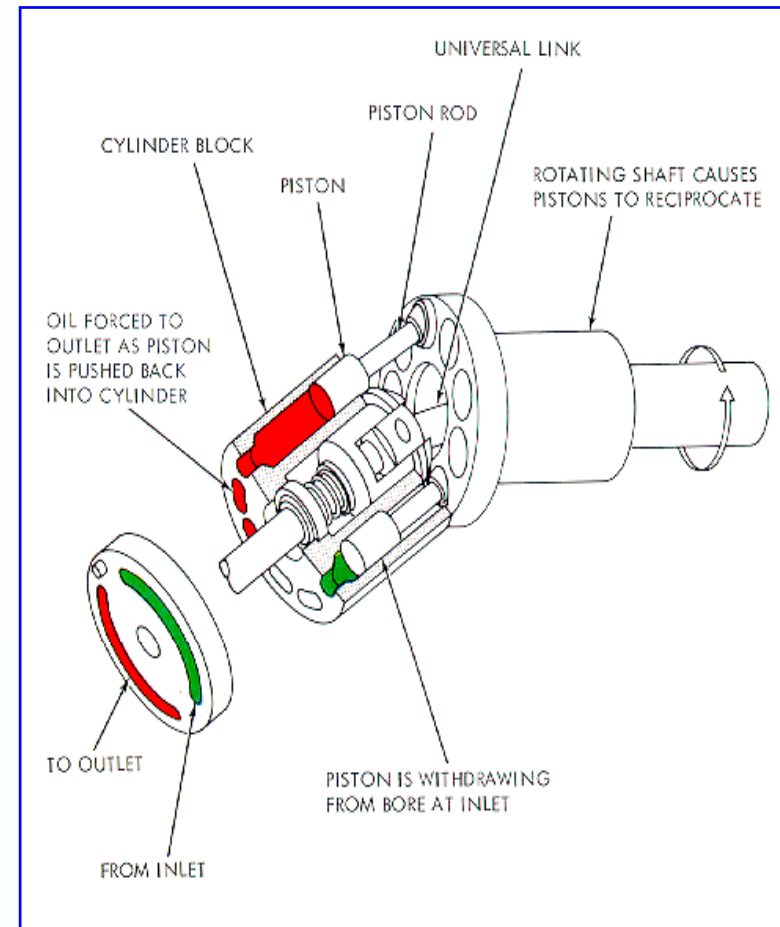


Pressure Compensation

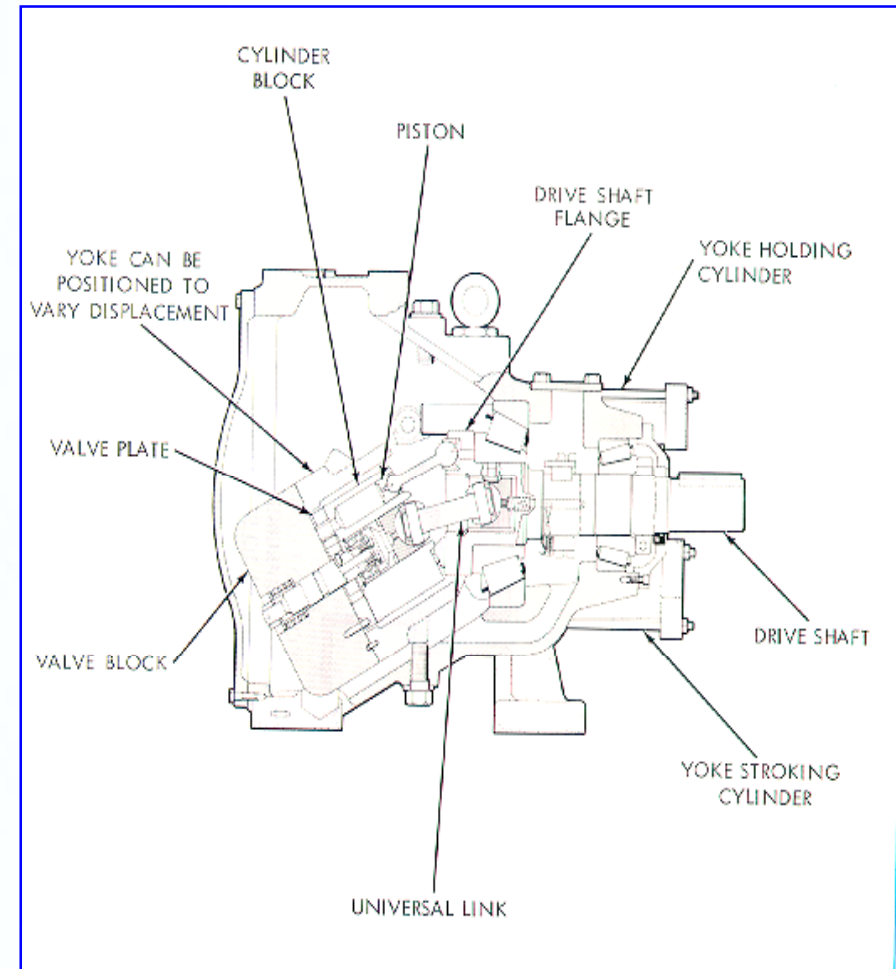
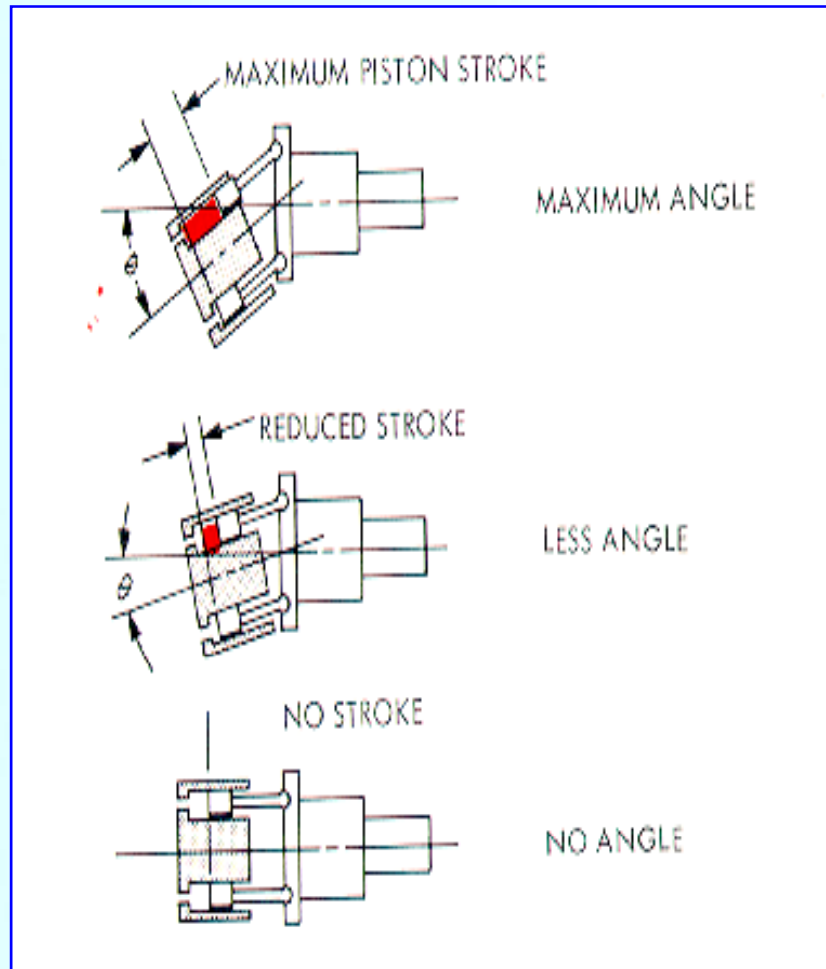


Bent-Axis Type Piston Pump

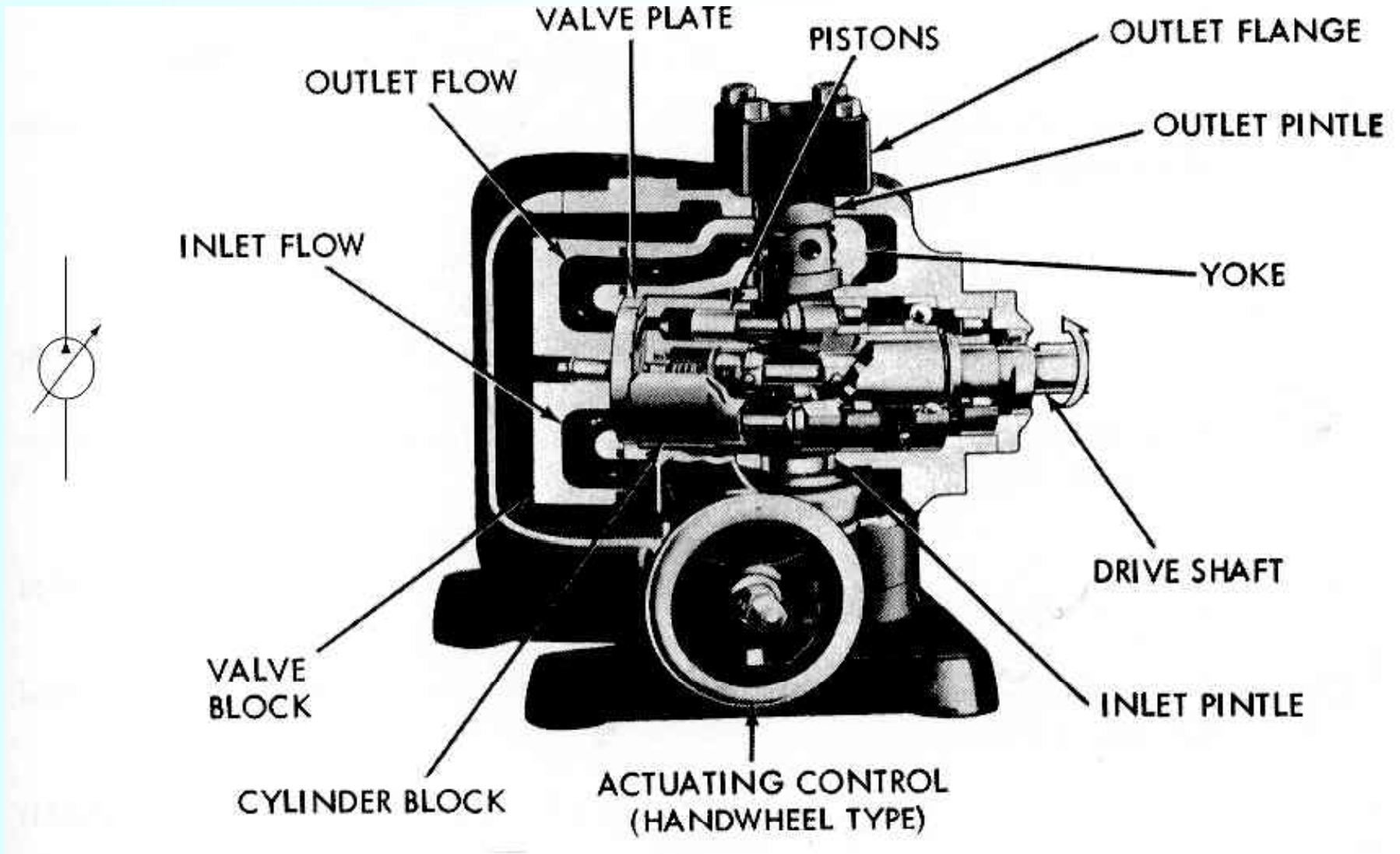
- 축, CYLINDER BLOCK, PISTON 등이 회전
- 밸브판(VALVE PLATE)은 고정
- 축의 단부에 PISTON의 구면부가 물려 동시에 회전
 - 축이 회전하게 되면 PISTON은 같이 따라 돌며 실린더내에서 축방향으로 왕복운동을 한다



Variable Displacement Bent-Axis Piston Pump

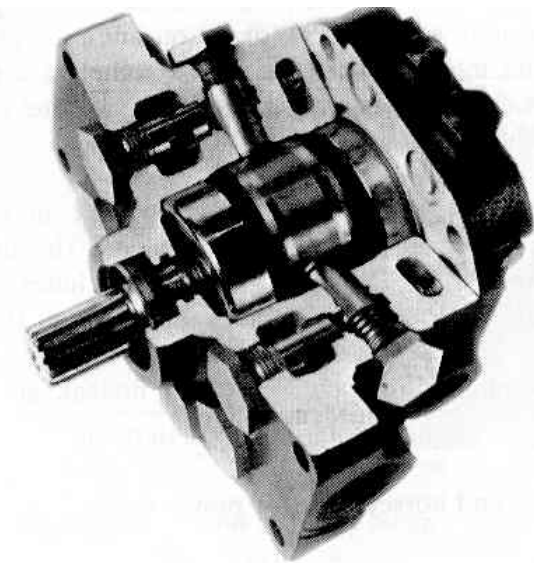
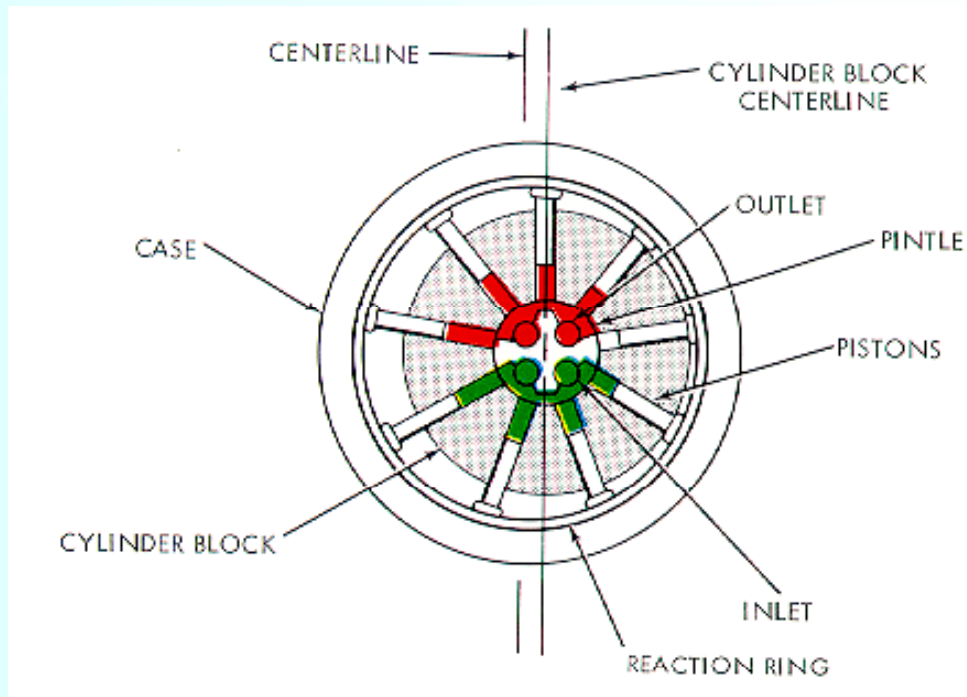


Variable Displacement Piston Pump with Handwheel

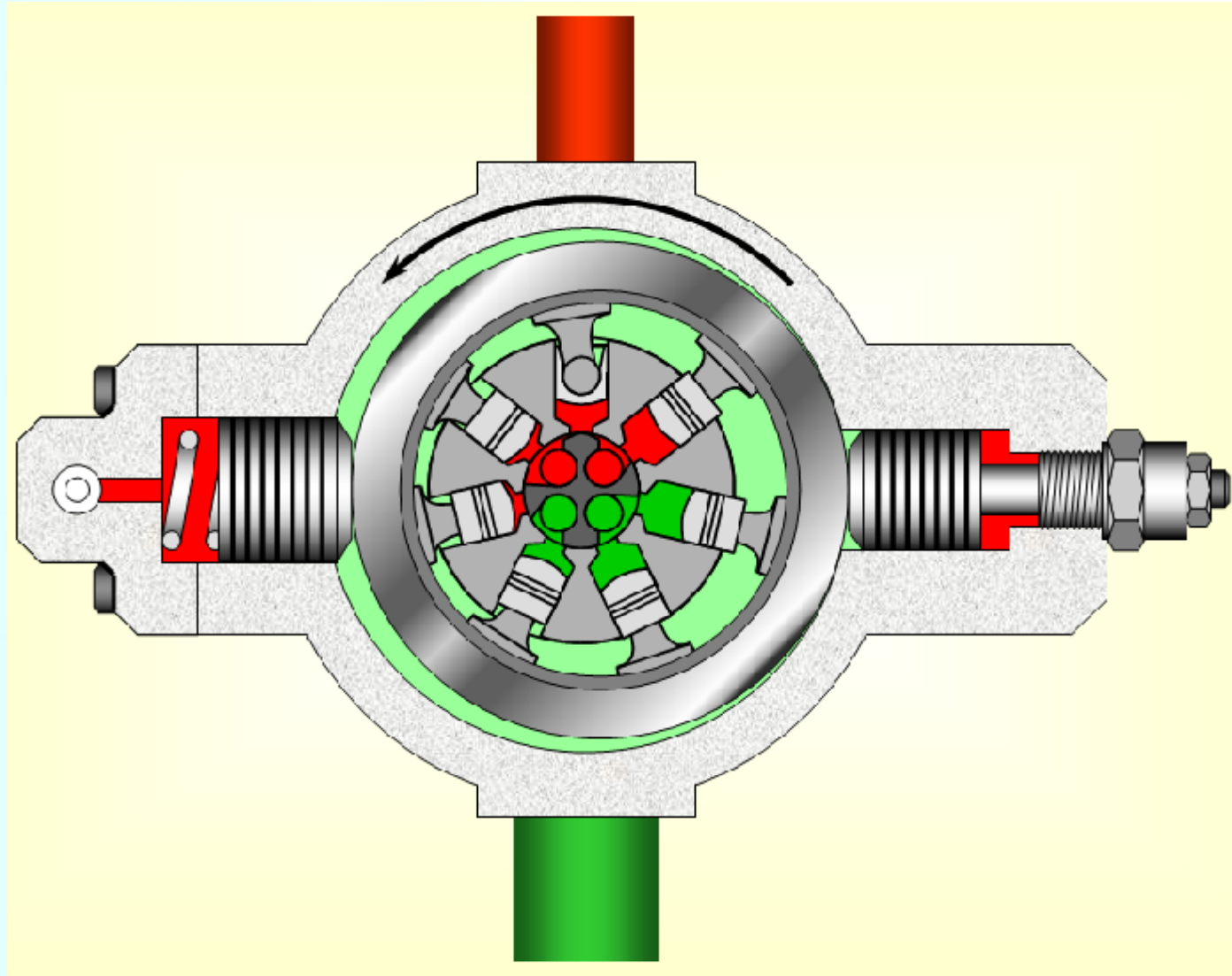


Radial Piston Pump

- 실린더 블록의 회전 여부에 따라, 회전 실린더형과 고정 실린더형으로 구분
- 가변용량형이 가능
- **20bar** 이상의 고압용에 주로 사용
- 항공기, 산업용으로 널리 사용



Radial Piston Pump



Volumetric Displacement & Theoretical Flow Rate

- θ : offset angle ($^\circ$)
- S : piston stroke (in, m)
- D : piston circle diameter (in, m)
- Y : number of pistons
- A : piston area (in^2, m^2)
- N : pump speed (rpm)
- Q_T : theoretical flow-rate (gpm, m^3/min)

$$\tan(\theta) = \frac{S}{D} \qquad S = D \tan(\theta)$$

$$V_D = YAS = YAD \tan(\theta)$$

$$Q_T (\text{m}^3 / \text{min}) = DANY \tan(\theta)$$

피스톤 펌프 특징

■ 특징

- 가변용량이 가능
- 효율이 높다
 - 용적효율: 97%
 - 전효율: 90%
- 고압용: 200bar
- 베인펌프보다 소음이 심하다
- 항공기, 산업용
- 가격이 비싸다

■ 사판식

- 비교적 고속회전에 적합
- 마력당 중량이 작다
- 사축식에 비해 구조가 간단

■ 사축식

- 제작비용이 많이 든다
- 누설 손실이 적다
- 사판식 보다 효율이 조금 좋다

5.7 Pump Performance

■ 배제용적 **Displacement**

- 단위 회전당 토출하는 체적(이론)
- 토출량 / 회전속도 (실험)
- 최소 토출압력, 정격 회전속도 조건

사용 단위 : m^3 / rad , cc / rev

- 정격압력: 설계상의 기준치
- 정격회전속도: 정격압력으로 연속운전 가능한 설계상의 기준이 되는 회전속도
- 무부하 토출압력: 시험설비가 허용하는 토출압력의 최소치



Pump 구동에 필요한 Torque

- Mechanical power supplied to pump

$$H_m = T\omega$$

- Hydraulic power delivered by pump

$$H_p = PQ$$

P: pressure rise across the pump

Q: delivery rate

- 두 관계식으로부터

$$T_{th}\omega = PQ_{th} = P\omega D_p$$

$$T_{th} = PD_p \quad \text{여기서 } D_p : \text{펌프 배제용적}[m^3/rad]$$

Torque 손실

■ Viscous Damping Torque: Fluid shear에 의한 손실

$$T_d = B_m \omega = C_d D_m \mu \omega$$

$$B_m = C_d D_m \mu: \text{Damping coefficient}$$

$$C_d: \text{무차원 Damping coefficient}$$

$$\mu: \text{절대 점도}$$

■ Coulumb Friction Torque: 작용력-마찰력에 의한 손실

$$T_f = \frac{\omega}{|\omega|} C_f D_m (P_1 + P_2)$$

$$C_f: \text{내부 마찰 계수}$$

■ Seal Friction Torque: shaft seal에서 발생

$$\frac{\omega}{|\omega|} T_c$$

Pump Efficiency Measurement

■ Volumetric efficiency (η_v): 누설과 관련

- 압력이 낮을수록, 속도가 빠를 수록 용적 효율 좋다.
- 일반적으로 용적 효율은 **90%**

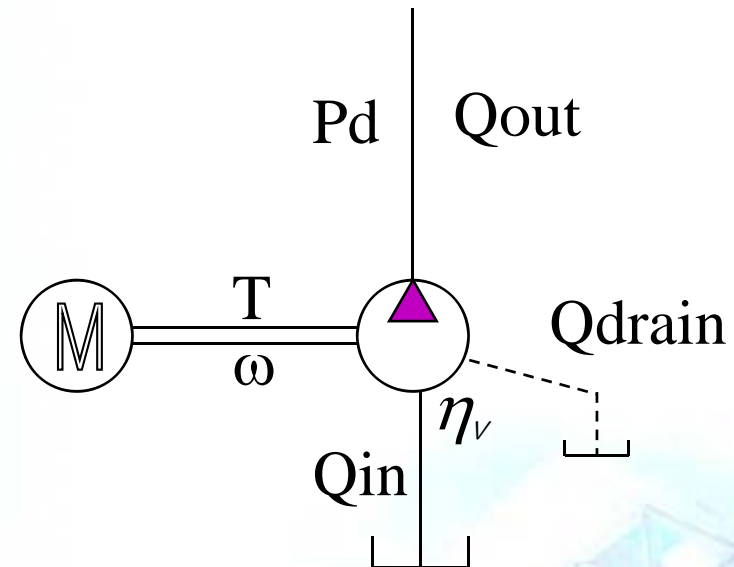
$$\begin{aligned}\eta_v &= \frac{\text{실제 유량}(Q_{OUT})}{\text{이론 유량}(Q_{th})} \\ &= \frac{Q_{th} - \Delta Q}{Q_{th}} = 1 - \frac{\Delta Q}{Q_{th}} \\ &= 1 - C_s \frac{P_d}{\mu \omega}\end{aligned}$$

where,

$$\Delta Q = \delta^3 \frac{P_d}{\mu} = C_s D_p \frac{P_d}{\mu}; (\text{누설유량})$$

μ : 점도, δ : 누설 틈새,

C_s : 무차원의 누설계수



Pump Efficiency

■ Mechanical efficiency (η_m): 마찰과 관련

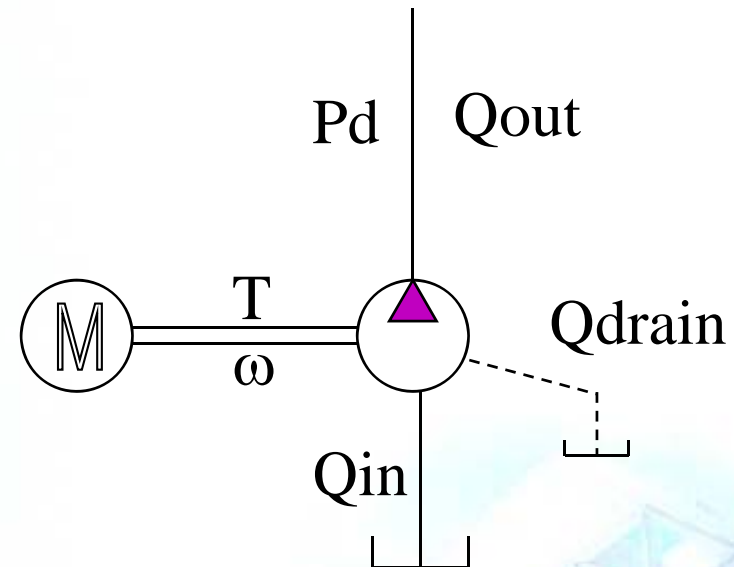
- 압력이 높을수록, 속도가 느릴수록 기계효율 좋다
- 마찰과 관련

$$\begin{aligned}\eta_m &= \frac{\text{이론 수요 토크 } (T_{th})}{\text{실제 수요토크 } (T)} \\ &= \frac{T_{th}}{T_{th} + \Delta T} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta T}{T_{th}}} \\ &= \frac{1}{1 + C_f + C_d \frac{\mu\omega}{P_d}}\end{aligned}$$

where ,

$$\Delta T = \frac{D_p}{2\pi} (C_d \mu\omega + C_f P_d)$$

C_d, C_f : 무차원의 마찰계수

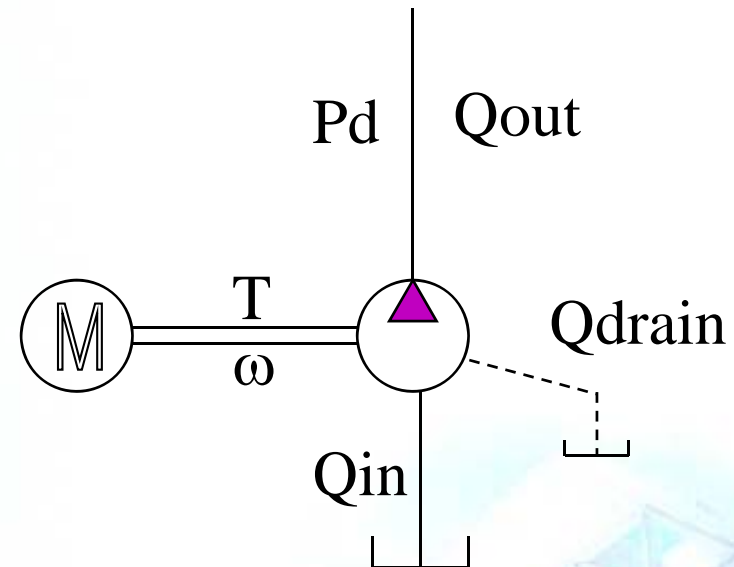


Pump Efficiency

Overall efficiency (η_o)

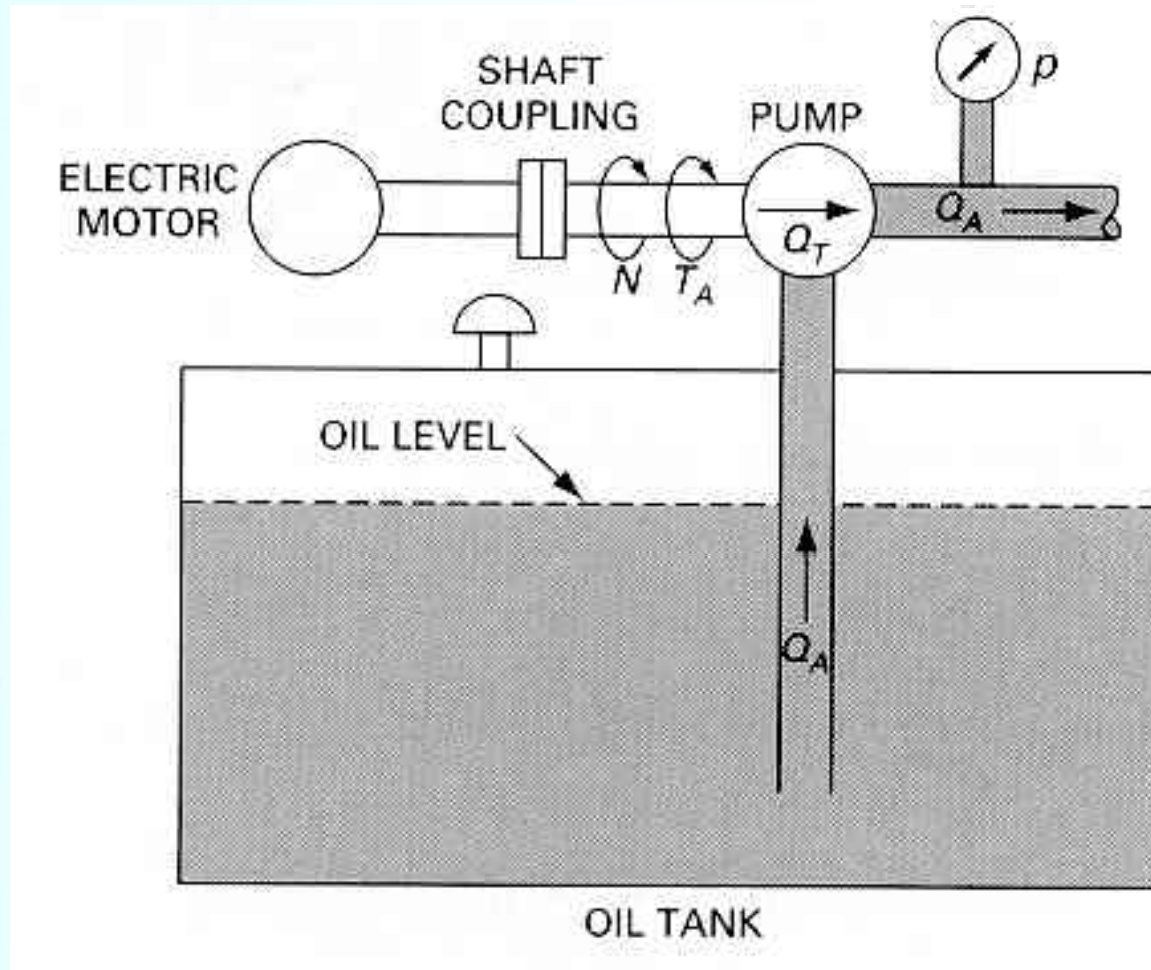
- 에너지 절약을 위해서는 전효율이 가장 좋은 압력과 속도에서 주로 작동하는 것이 좋다.

$$\begin{aligned}\eta_o &= \frac{\text{실제 출력 유체동력}(H)}{\text{공급된 기계 동력}(H_m)} \\ &= \frac{PQ}{T\omega} \\ &= \frac{PD_p}{T} \frac{Q}{D_p\omega} \\ &= \eta_v \eta_m\end{aligned}$$



Pump Efficiency Measurement

■ Terms involving pump mechanical efficiency



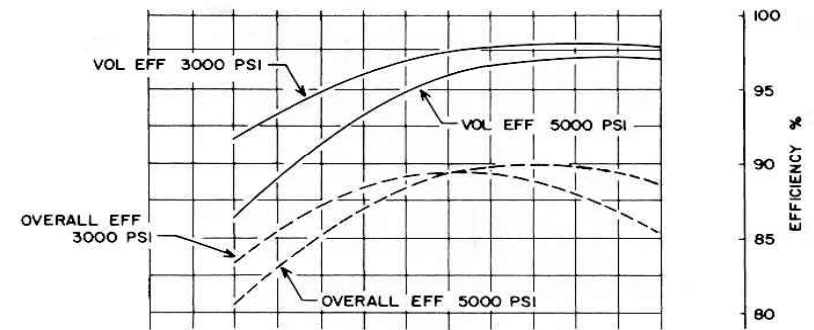
Performance Curves of Piston Pump

■ 6-in³ variable displacement pump

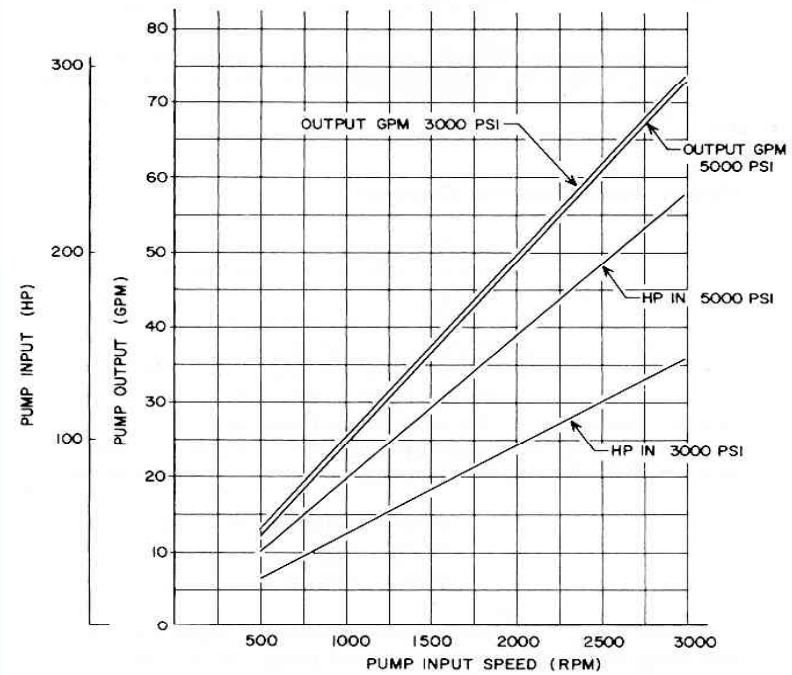
■ Pressure Level

■ 3,000psi

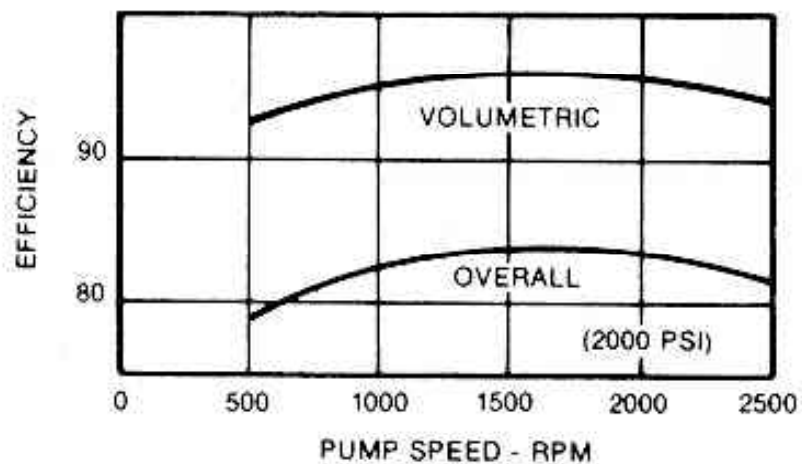
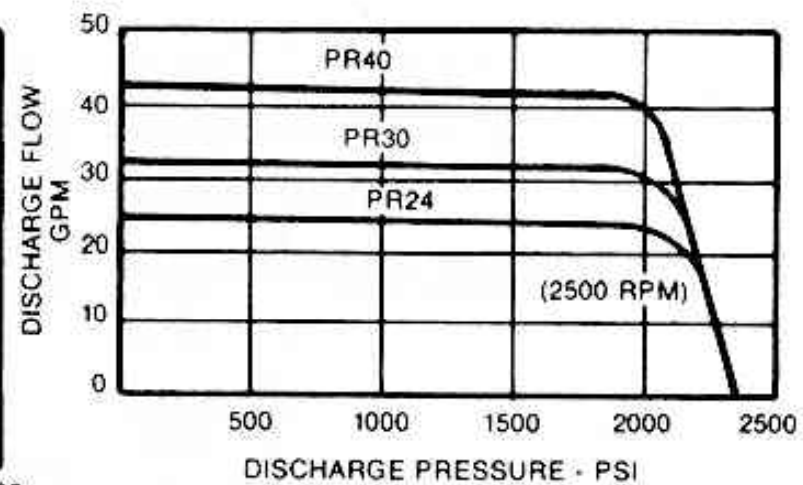
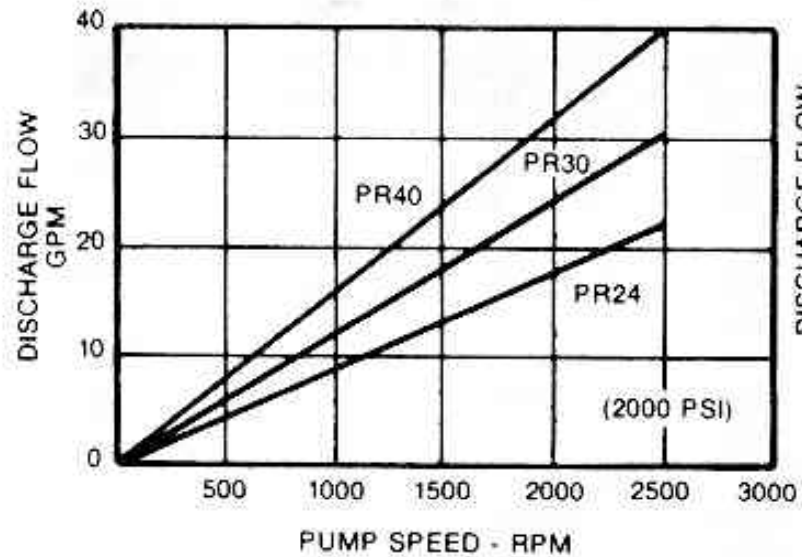
■ 5,000psi



THESE CURVES INCLUDES LOSSES FROM INTEGRAL SERVO/CHARGE PUMP & TRANSMISSION VALVE PACKAGE



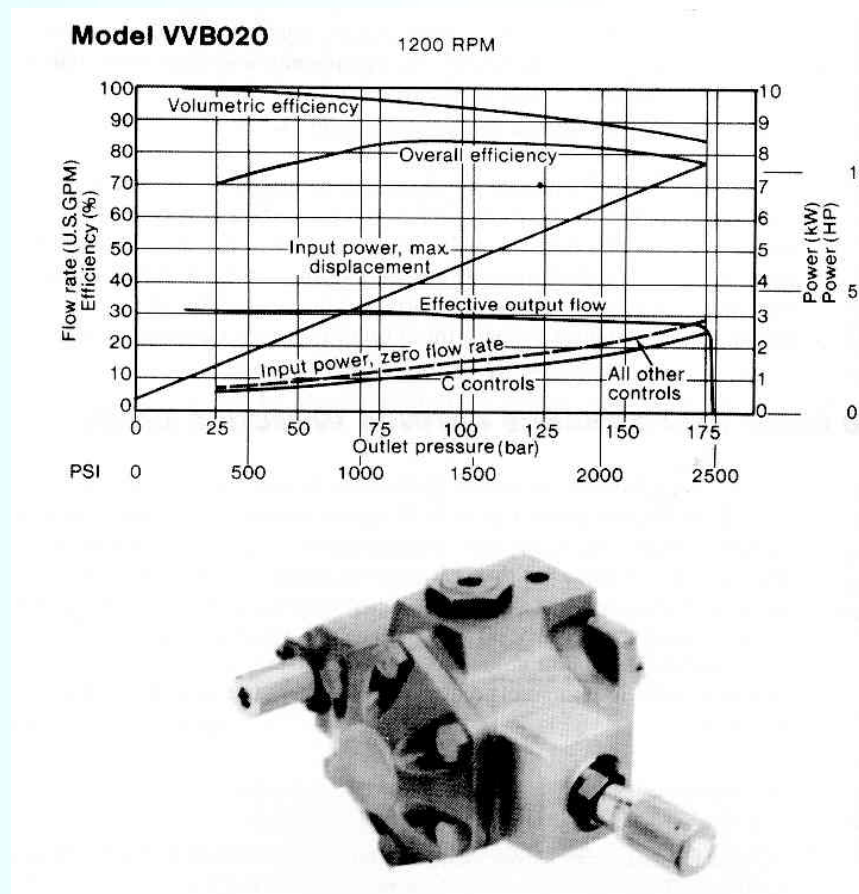
Performance Curves of Radial Piston Pumps



- PR24: 2.40-in³ displacement
- PR30: 3.00-in³ displacement
- PR40: 4.00-in³ displacement

Performance Curves for Vane Pump

- Performance curves for variable displacement pressure-compensated vane pump at 1200rpm



Comparison of various performance factors

PUMP TYPE	PRESSURE RATING (PSI)	SPEED RATING (RPM)	OVERALL EFFICIENCY (PER CENT)	HP PER LB RATIO	FLOW CAPACITY (GPM)	COST (DOLLARS PER HP)
EXTERNAL GEAR	2000–3000	1200–2500	80–90	2	1–150	4–8
INTERNAL GEAR	500–2000	1200–2500	70–85	2	1–200	4–8
VANE	1000–2000	1200–1800	80–95	2	1–80	6–30
AXIAL PISTON	2000–12,000	1200–3000	90–98	4	1–200	6–50
RADIAL PISTON	3000–12,000	1200–1800	85–95	3	1–200	5–35

5.8 Pump Noise: Common Sound Levels

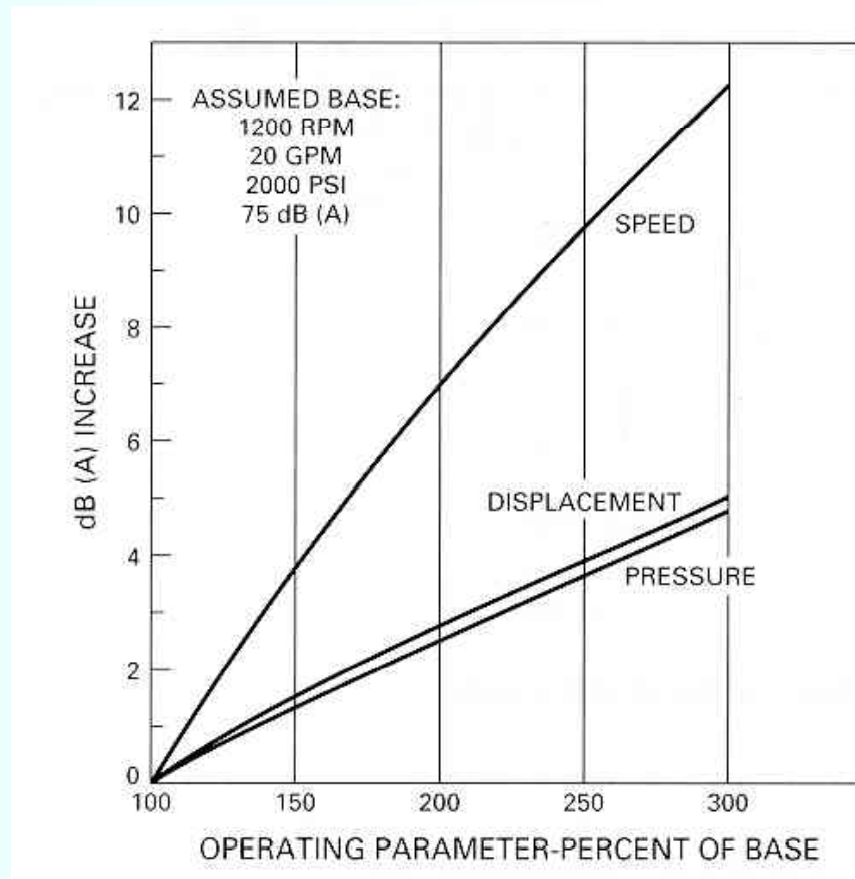
[unit: dB]

Threshold of Pain	140	Jet Takeoff at Close Range
	130	Hydraulic Press
	120	Nearby Riveter
Deafening	110	Amplified Rock Band
	100	Noisy City Traffic
Very Loud	90	Noisy Factory, Gear Pump
	80	Vacuum Cleaner, Vane Pump
Loud	70	Noise Office, Piston Pump
	60	Average Factory, Screw Pump
Moderate	50	Average Office
	40	Private Office
Faint	30	Quiet Conversation
	20	Rustle of Leaves
Very Faint	10	Whisper
	0	Threshold of Hearing

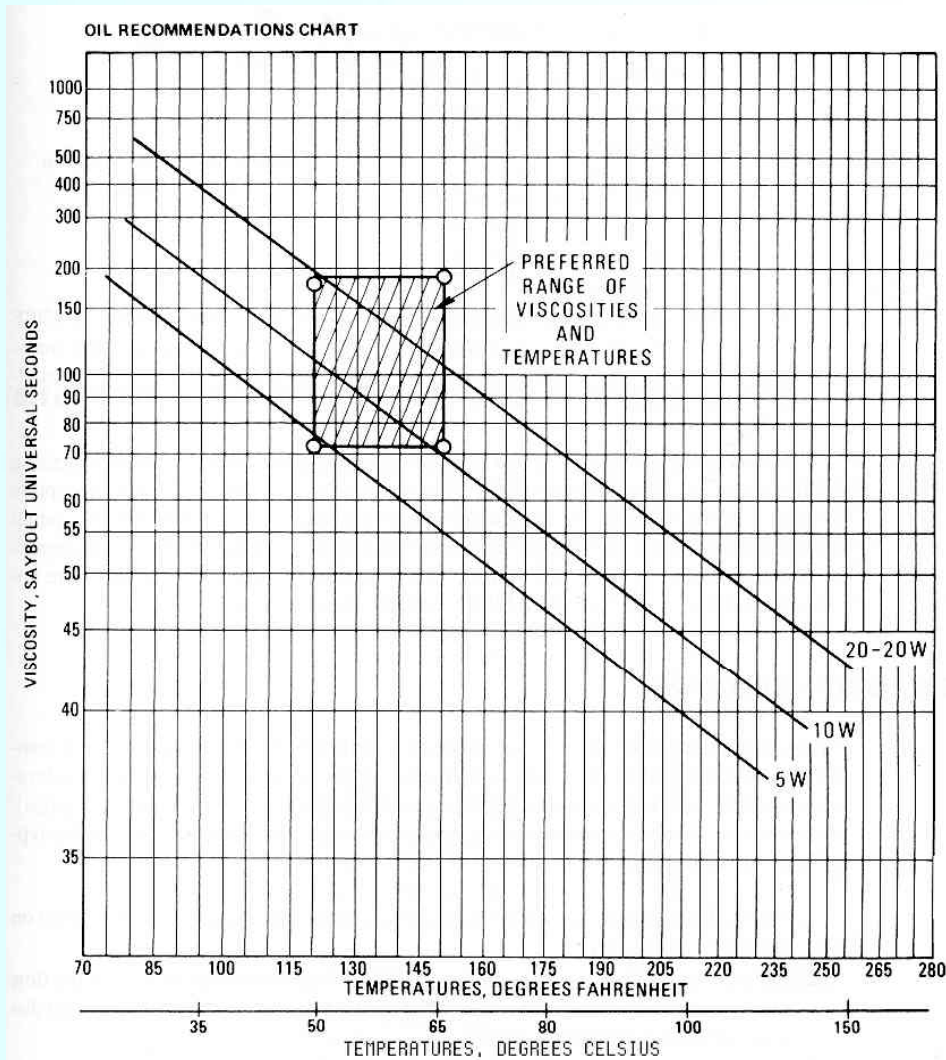


Pump Noise as a Performance Parameter

- Data showing effect of changing size, pressure, and speed



Preferred Range of Oil Viscosities & Temperatures



Noise levels for
various pump design

Pump Design	Noise Level (dB-A)
Gear	80-100
Vane	65-85
Piston	60-80
Screw	50-70

5.9 Pump Selection

■ 기본 사양

- 펌프 크기 즉 배제영적 : 출력장치의 속도
- 정격압력 : 출력장치가 발생하는 최대힘, 부하저항 사이클
- 원동기 속도 : 펌프의 토출 유량

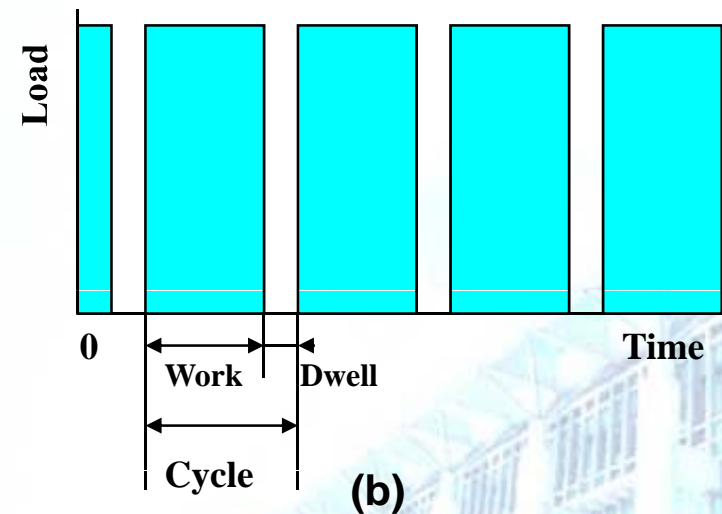
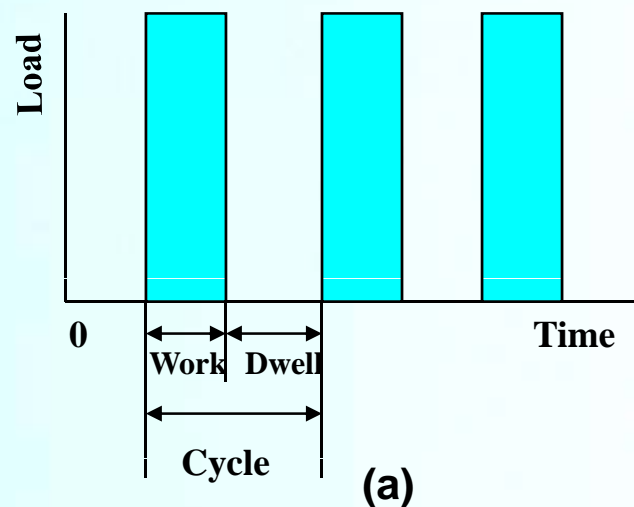
- 펌프 수명 : 펌프내 베어링의 **B-10** 정격수명, 내구시험에 의한 마모특성
- 설치와 포트 연결문제 : 다른 부품과의 조합성, **O-ring**, 테이퍼 나사
- 크기와 중량
- 효율 : 용적효율, 기계효율, 전효율
- 초기 가격

- 수리문제 : 서비스 부품의 구입, 교환의 용이성
- 납기문제
- 수요자 선택 : 수요자 요구, 경쟁 기종
- 실적

Pump Selection

■ 부하율

- 간헐 부하 (그림 a)
- 연속 부하 (그림 b)
- 경부하(light duty) : 부하계수(load factor)가 정격 최대용량의 25%이내
- 중간부하(medium duty) : 부하계수가 25%이상 75%이내
- 중부하(heavy duty) : 부하계수가 75%이상



Pump Selection

■ 가격요인

■ 시스템 필요조건의 관리(계획)

- 유체의 종류(fluid type)
- 사용 정격 압력
- 작동교체모드
- 여유율과 수명
- 시스템의 교체

■ 펌프의 특성

- 정용량형 펌프 : 통상적으로 가격이 저렴하나 제어에 필요한 여러가지 부품의 가격이 고려되어야 한다.
- 가변 용량형 펌프 : 가격은 고가이나 필요한 제어장치가 적다.
- 시스템의 배치는 펌프 타입의 선택에 영향을 미치고, 펌프의 종류에 따라 필요한 공간이 달라진다. (ex. 원심펌프 < 왕복펌프, 수직펌프 < 수평펌프)

- 대체로 같은 용량에서는 기어펌프가 가장 싸고 피스톤 펌프가 가장 비싸다. 베인펌프는 중간정도의 가격이다.



펌프 선정 지표

- 펌프 종류
 - 시스템 압력, 작동유 고려
 - 기어펌프, 베인펌프, 피스톤펌프
- 사용 압력: **rated pressure**
 - 펌프 제조사는 통상 전효율이 가장 좋은 압력 또는 베어링 수명과 효율을 동시에 고려하여 사용압력을 제시
- 최대 압력: **max. pressure**
 - 펌프가 견딜 수 있는 최대 압력
- 흡입 압력: **suction pressure**
 - 낮을 수록 좋다.
 - 흡입압력이 높아야 할 경우에는 탱크 가압
- 배제용적: **volumetric displacement**
 - 1회전당 토출하는 작동유의 부피 (**cc/rev**)
 - 시스템 유량과 원동기의 회전 속도에 따라 결정
 - 배제용적
= 필요 유량 / 원동기 회전 속도
- 최대 속도: **max. speed**
 - 펌프의 기계적 특성으로 최대 회전 속도가 제한
- 점도 범위: **viscosity range**
 - 작동유 종류, 선정
- 온도 범위
 - **seal**, 작동부의 열팽창 고려
- 유압유 청정도
- 용량 가변 여부
- 회전 방향
- 설치 방법
 - 원동기와의 설치 방법과 형상에 따라
- 축형상
 - 축 연결 방법
- 연결구
 - 배관 설계 고려
- 기타
 - 부속 부품
 - 외관 크기

참고: 펌프의 설계 - 기어 펌프

(1) 작동원리 및 분류

- 외접 기어 펌프
- 내접 기어 펌프

(2) 체적유량 및 유량의 맥동

(3) 작용력과 모멘트

- 치차의 작용력 해석
- 펌프 케이스의 부하

(4) 축 방향과 반경 방향의 간극보상

(5) 주요치수의 결정

(6) 펌프설계의 예



Report

■ Text Problems

■ 5-24

■ 5-46

■ 5-58

■ 5-60

■ Due date: 2주 후