

APPLIED FLUID MACHINERY

WANG-HEE LEE



CHUNGNAM NATIONAL UNIVERSITY
BIOSYSTEMS MACHINERY ENGINEERING

LECTURE 13

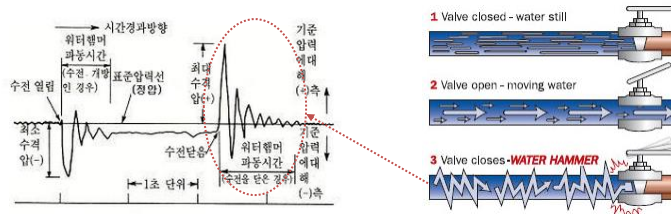
PHENOMENA IN PUMP

Water hammering (수격작용)

- 관속을 중단하게 흐르고 있는 액체의 속도를 급격히 변화시키면 액체의 과도한 압력의 변화가 발생하는데 이를 수격작용이라 한다.



관로에 있는 밸브를 갑자기 닫을 경우 유동이 감속되는 분량의 운동에너지가 압력에너지로 변하게 된다. 따라서 밸브의 직면인 A지점에서 고압이 발생하고, 이 압력파에 의해 상류 탱크 쪽의 B지점에 도달하게 되며, B에 도달하면 다시 A로 되돌아 온다. 결국 이 압력파는 A, B 사이를 왕복하게 되며, 이것을 계속 반복한다.



CNU 충남대학교

PHENOMENA IN PUMP

수격작용의 원인

● 수격작용은 다음의 원인으로 인해 발생한다.

- ① 펌프의 기동: 펌프의 기동시 Pipe내에 Void Space(커다란 부피의 공기 또는 가스)가 존재하면 급격한 압축력에 의해 높은 압력상승을 유발한다.
- ② 펌프의 급정지: 갑작스런 정전 등으로 인하여 펌프가 급정지하게 되면, 펌프 토출측에서는 급격한 압력 저하가 발생되고, 저하된 압력파는 매우 빠른 속도(음속)로 반대방향으로 전파된다. 압력의 저하는 경우에 따라 수주분리현상을 발생시키고, 저하된 압력이 그 유체의 증기압보다 낮을 경우, 증기가 방출되어 Cavitation이 발생한다. 이로 인한 Vapour Cavity가 형성된 공동부의 압적으로 인하여 발생하는 충격력은 매우 높은 경우가 많다.
- ③ 밸브의 급개폐: Water Hammer의 발생원인 중에서 가장 잘 알려져 있고, 일반적인 것이 밸브의 개폐이다. 펌프의 토출측에 설치되는 Check Valve가 완전히 닫히기 전에 역류가 발생되면 밸브에 충격이 발생하여, 밸브를 급격히 닫을 때와 마찬가지로 Water Hammer가 발생할 수 있다.

PHENOMENA IN PUMP

수관중의 압력파의 전파속도

● 관로내에서 압력파의 전파속도

$$a = \sqrt{\frac{k/\rho}{1 + KD/E\delta}}$$

a : 전파속도 (m/s)
 K : 물의 체적탄성 계수 (kg/m^2)
 ρ : 물의 밀도 ($\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$)
 E : 관의 종탄성 계수 (kg/m^2)
 D : 관의 안지름 (m)
 δ : 관벽의 두께 (m)

판이 완전한 강성체일 때, $E = \infty$ 라 할 수 있으므로,

$$a = \sqrt{\frac{k/\rho}{1 + \cancel{KD/E\delta}}} \longrightarrow a = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

$E = \infty \rightarrow KD/E\delta = 0$

체적탄성계수

유체가 힘(압력)을 받았을 때, 압축이 되는 정도를 나타내는 상수 (고체의 탄성계수, 즉 스프링의 탄성계수와 유사한 개념으로 이해). 스프링계수는 길이의 변화에 대한 것인데 비해, 체적탄성계수는 체적의 변화에 대한 계수인 점이 다르다. 스프링계수가 클수록 힘에 비해 길이가 잘 줄어들지 않는 것과 마찬가지로 체적탄성계수가 클수록 잘 압축이 되지 않는 유체임을 나타낸다. 즉, 체적변화율에 대한 압력 변화율의 비로서 단위는 N/m^2

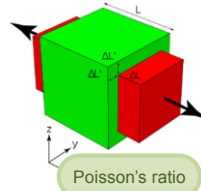
$$E = -\frac{\Delta p}{-\Delta V/V_0}$$

PHENOMENA IN PUMP

수관중의 압력파의 전파속도

- 관재료의 물성을 고려하는 경우

$$a = \sqrt{\frac{k/\rho}{1 + \frac{KD}{E\delta}(1 - \mu^2)}} \quad \mu: \text{관재료의 Poisson's ratio}$$



Poisson's ratio 평변형률:

$$\frac{\text{허중이 작용하는 수직방향으로의 변형}}{\text{종변형률}} = \frac{\Delta L'}{\Delta L}$$

- 공기의 혼입을 고려하는 경우

$$a = \sqrt{\frac{k/\rho_{mix}}{1 + \frac{KD}{E\delta}(1 - \mu^2) + \alpha_m \frac{K}{K_{air}}}}$$

$$\rho_{mix} = (1 - \alpha_m)\rho$$

α_m : Void fraction (공기체적/혼합물의 전체체적) → 공기함량

K : 액체의 체적탄성계수

K_{air} : 공기의 체적탄성계수

공기의 체적탄성계수

등온과정 $K_{air} = P_0$ (Valve 닫기 전 수관의 압력)

등엔트로피과정 $K_{air} = 1.4P_0$

폴리트로픽과정 $K_{air} = 1.2P_0$

CNU 충남대학교

PHENOMENA IN PUMP

밸브를 닫는 속도에 따른 발생압력

- 밸브를 급격히 닫는 경우

$t_s < 2L/a$ 인 경우 밸브를 급격히 닫는 경우라 할 수 있다.

$$P = P_0 + \gamma h \quad \leftarrow \quad h = \frac{aV_0}{g}$$

최고상승압력(최대압력과 밸브를 닫기 전 수관의 압력의 차이)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{max} - P_0 = \frac{\gamma a V_0}{g}$$

- 밸브를 서서히 닫는 경우

실험에 의하면 밸브가 닫히기 시작하면서 압축파가 관내를 왕복하는 동안에 압력은 직선적으로 상승한다. 압력상승은 밸브가 닫힐 때까지 ($2L/a - t_s$) 대략 일정한 최고치를 가진다. 그 후 변동을 계속하면서 압력은 차차 내려간다.

최고압력상승률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{P_{max} - P_0}{P_0} = \frac{1}{2}(\eta^2 + \eta\sqrt{\eta^2 + 4})$$

$$\eta = \frac{\rho L V_0}{P_0 t_s}$$

CNU 충남대학교

PHENOMENA IN PUMP

수격작용의 문제점 및 대책

● 수격작용으로 인한 문제점

- ① 배관의 파손 위험
- ② 고압의 발생
- ③ 배관의 진동 충격음 발생

● 수격작용에 대한 대책

- ① 관 내 유속을 낮게 한다: 관성력을 작게 한다
- ② 펌프에 Fly wheel부착: 급격한 속도변화 감소
- ③ 공기밸브 설치: 펌프 토출라인에 공기조를 설치하여 이상 압력상승 방지
- ④ Surge tank 설치: 관로도중에 큰 탱크를 설치하여 물을 보급하여 압력강하 방지와 압력상승 흡수
- ⑤ Air chamber설치: 공기조는 물과 공기가 들어있는 밀폐용기로 펌프 토출측에 설치하여, 부압 발생시 에너지방출, 양압발생시 압력에너지를 흡수하여 압력급상승 및 급강하 방지
- ⑥ 자동 수압조정밸브 설치
- ⑦ 압력상승 방지법: 릴리프밸브나 스모렌스키 체크밸브 설치
- ⑧ 수격흡수장치: Water hammering 방지기 설치



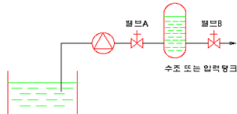
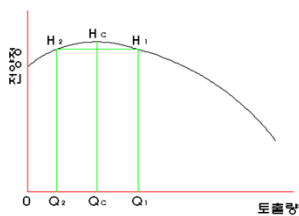
CNU 충남대학교

PHENOMENA IN PUMP

서어징 (Surging) 현상

● 펌프가 운전 중에 현상을 쉬는 것과 같은 상태가 되어 펌프의 입구와出口的 진공계, 압력계의 지침이 흔들리고 동시에 송출유량이 변화하는 현상을 말하며, 송출압력과 송출유량 사이에 주기적인 변동이 일어나는 현상을 말한다

- 이로 인해 흡입 및 토출 배관의 주기적인 진동과 소음을 유발하게 된다.



- 우상향 유량-양정 곡선에서 유량의 수요가 감소하여 특성곡선의 최대 양정 때의 유량 Q_c 에서 Q_2 로 줄이게 되면 이때의 관로의 토출압은 H_c 보다 커야 하는데 펌프의 실제 토출양정은 그것보다 낮은 H_2 가 된다. 따라서 물은 펌프내에서 역류하면서 H_1, H_2 로 떨어진다. 이 역류하는 물의 보충에 의해 역류는 정지하며, 펌프는 다시 토출을 시작하여 운전상태는 점 H_1 으로 이동한다. 그러나 점 H_1 의 유량은 수요에 대해 과다하므로 운전상태는 곧 점 H_c 로 이동하여 점 c 에 도달하면 역류가 시작된다. 이렇게 하여 $H_1 \rightarrow H_c \rightarrow H_2$ 으로 상태변화를 반복한다.
- 즉, H_1 좌변의 운전은 유량(Q)이 증가하면 압력도 증가하여 펌프는 유량방향과 같이 H_2 우변에서 운전하고자 하고 H_c 우변에서의 운전은 유량이 증가하면 압력은 감소하여 펌프는 유량 반대방향으로 H_c 좌변에서 운전하고자 한다. 그러므로 펌프의 운전은 H_c, Q_2 로 되돌아오고 같은 동작이 반복되어 유량-수두는 주기적으로 변동을 반복한다.
- Surging은 관로 관계가 단순하지 않는 경우가 대부분이고 송출량을 조절하는 밸브의 위치가 서징발생 유무에 크게 관계된다.

CNU 충남대학교

PHENOMENA IN PUMP

서어징 발생 조건

● 서어징은 다음의 조건이 동시에 갖추어졌을 때에 한하여 발생한다.

- ① 펌프의 H-Q 곡선이 오른쪽 위로 향하는 산형구배 특성을 가지고 있다.
- ② 펌프의 토출관로가 길고, 배관 중간에 수조 또는 기체 상태의 부분(공기가 있는 부분)이 존재한다.
- ③ 기체상태가 부분의 하류측 밸브에서 토출량을 조절한다 (유량조절 밸브가 탱크 뒤쪽에 있다.)

● 즉, 펌프가 산형구배 특성을 가지고 있어도 상기의 조건 중에서 어느 하나의 조건이 만족되지 않으면 서어징은 발생하지 않는다.

- 예를 들면, 펌프의 직후 밸브만으로 유량을 조절하는 경우에는 서어징이 발생하지 않는다.

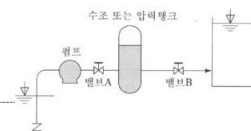
PHENOMENA IN PUMP

서어징의 문제점 및 방지법

● 서어징으로 인한 문제점

- ① 헤드 또는 방수구에서의 실수발도저하
- ② 한번 발생시 그 변동 주기는 비교적 일정하고 송출밸브로 송출량을 조작하여 인위적으로 운전 상태를 바꾸지 않는 한 이 상태가 지속된다.
- ③ 흡입 및 토출 배관의 주기적인 진동과 소음을 수반

● 서어징의 방지법



- ① 펌프의 H-Q 곡선이 우하향 구배를 갖는 펌프를 선정한다.
- ② By-Pass관을 사용하여 운전점이 Surging 범위를 벗어난 범위에서 운전하도록 한다. 예를 들어, 방출밸브들을 사용하여 양수량을 서어징일 때의 양수량 이상으로 증가시킨다. 또는 펌프 회전자의 회전수를 변화시킨다.
- ③ 유량조절밸브를 펌프 토출측 직후에 설치한다.
- ④ 관로에 불필요한 공기탱크나 잔류공기를 제거하여 배관중에 수조 또는 기체상태인 부분이 존재하지 않도록 배관하며, 관로의 단면적, 양수역의 유속, 저항 등을 변화시킨다.
- ⑤ 회전자나 안내기의 형상치수를 바꾸어 그 특성을 변화시킨다. 특히, 날개의 출구각을 작게 하거나 안내기의 각도를 조절할 수 있도록 배려한다.