

배관 유동의 주요 변수계산을 위한 소프트웨어 시스템의 개발

창재훈* · 이건희* · 정민영* · 백흥경** · 이창하*** · 오민*†

*한밭대학교 화학생명공학과
34158 대전광역시 유성구 동서대로 125
**도프텍 주식회사

04104 서울 마포구 백범로 1길 83
***연세대학교 화공생명공학과

03722 서울특별시 서대문구 연세로 50

(2019년 2월 28일 접수, 2019년 4월 16일 수정본 접수, 2019년 4월 23일 채택)

Software Package for Pipe Hydraulics Calculation for Single and Two Phase Flow

Jaehun Chang*, Gunhee Lee*, Minyoung Jung*, Heumkyung Baek**, Changha Lee*** and Min Oh*†

*Department of Biological and Chemical Engineering, Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34158, Korea

**Doftech Corporation, 3F, 83, Baekbeom-ro 1-gil, Mapo-gu, Seoul, 04104, Korea

***Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 03722, Korea

(Received 28 February 2019; Received in revised form 16 April 2019; accepted 23 April 2019)

요 약

다양한 산업 공정에서 배관은 각 단위공정 사이의 연결 매개체의 역할을 하며, 내부의 유동에 있어 필수적인 장치이다. 따라서 배관의 최적설계는 안전과 비용의 측면에서 매우 중요한 문제이며, 설계 시 필수적인 사항은 배관 내 압력강하 및 유속, 배관 지름 등을 결정하는 일이다. 본 연구에서는 배관 지름 및 유속이 정해졌을 때 발생하는 압력강하, 배관의 압력강하 및 유속이 정해졌을 때의 배관 지름, 배관 지름 및 압력강하가 정해졌을 때의 유속을 결정하는 소프트웨어를 개발하였다. 배관 내 유동을 단일 상 흐름, 균질 2 상 유동, 분리 2 상 유동으로 구분하였으며 이에 따라 적절한 계산 모델을 적용하였다. 파이프의 재질 및 상대 거칠기, 유체의 물성치, 마찰계수의 계산을 위한 시스템 라이브러리를 구축하여 사용자의 입력을 최소화하였다. 배관 재질에 따른 가격 라이브러리를 구축하여 단위 길이당 배관 투자 비용의 산출을 가능하도록 구성하였다. 이러한 모든 기능은 사용자 편의를 위한 그래픽 사용자 인터페이스를 이용한 통합 환경에서 구현할 수 있으며, C# 언어를 개발 언어로 사용하였다. 소프트웨어의 정확도를 문헌 자료와 실험 수행 과정의 예제를 통하여 검증하였으며 단일 상의 경우 1% 미만, 2 상의 경우 최고 8.8% 정도의 차이를 보였으며, 이에 따라 개발된 소프트웨어가 실제 공정의 계산에 유용하게 쓰일 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract – In various industrial processes, piping serves as a link between unit processes and is an essential installation for internal flow. Therefore, the optimum design of the piping system is very important in terms of safety and cost, which requires the estimation of the pressure drop, flow rate, pipe size, etc. in the piping system. In this study, we developed a software that determines pressure drop, flow rate, and pipe size when any two of these design variables are known. We categorized the flows into single phase, homogeneous two phase, and separated two phase flows, and applied suitable calculation models accordingly. We also constructed a system library for the calculation of the pipe material, relative roughness, fluid property, and friction coefficients to minimize user input. We further created a costing library according to the piping material for the calculation of the investment cost of the pipe per unit length. We implemented all these functions in an integrated environment using a graphical user interface for user convenience, and C# programming language. Finally, we verified the accuracy of the software using literature data and examples from an industrial process with obtained deviations of 1% and 8.8% for the single phase and two-phase models.

Key words: Software development, Pipe hydraulics, Pressure drop, Velocity, Inside diameter, Material cost

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: minoh@hanbat.ac.kr

‡ 이 논문은 연세대학교 설용건 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

화학, 정유, 석유화학 등과 같은 다양한 산업 분야에서 배관은 유체의 이동을 위해 필수적인 장치로 배관 흐름으로 인한 압력강하, 유속 및 지름과 같은 주요 인자에 대한 계산은 운송 시스템과 같은 공학적 설계 및 안전설계에 있어 중요한 문제이다[1]. 배관 흐름은 이동되는 유체의 상에 따라 단상과 2상 유동으로 나누어진다. 단상 유동에서 기체 또는 액체 한가지 상의 유체가, 2상 유동은 기상과 액상이 공존한 상태로 배관을 따라 흐른다.

단상 배관 유동에 통용되는 이론으로, 비압축성 유체의 흐름에 적용 가능한 베르누이의 방정식이 있으며, 이를 통해 압력강하를 계산할 수 있다[2,3]. 또한 질소 흐름에 대한 실험 결과를 바탕으로 마이크로 채널 열 교환기에 대한 단상 유동 압력강하 연구가 수행되었으며[4] 평활관과 마이크로 핀 관의 압력강하를 실험적으로 연구하였다[5].

2상 유동 모델 중 가장 간단한 접근법은 균질 모델을 사용하는 것으로, 2상의 혼합물의 유동을 단상의 유동에 대한 설계방정식을 따르는 것으로 취급하는 모델이다[6]. 이러한 균질 유동모델에서 운동량이 지배적일 때 배관 안의 기포가 균일하게 분산되는 경향이 있으며 이것은 빠른 유속에서 유체가 유동에 따라 더 많은 기포를 생성하도록 유도하는 특성이 있다[7]. 마찰 압력강하는 배관의 입구와 출구 사이의 일정한 마찰 계수를 가정하여 계산된다. 이는 2상 유동의 액체 및 증기상을 적절히 평균화한 특성을 가지고 계산되며 균질 모델에서 액체와 기체상은 같은 속도로 움직인다는 가정을 포함하고 있다.

그러나 2상의 실제 거동은 비등 또는 압축을 통해 기체와 액체의 비율이 달라지며, 이로 인한 유체의 점도, 운동량, 표면 장력과 같은 시스템의 변화가 일어난다. 이에 따라 기포 유동, 환상 유동, 슬러그 유동, 분리 유동 등 여러가지 유동양식을 가진다[8]. 그 중 기체상과 액체상이 분리되어 흐르는 유동으로 나타나는 분리 유동 모델 마찰 압력강하에 대한 연구는 여러 연구를 통해 수행되었다[10-15]. 2상의 마찰 압력강하를 예측하는 모델은 크게 두 가지로 분류할 수 있으며, 경험적 방법을 토대로 주로 실험에 의해서 나온 결과를 바탕으로 만든 방법과, 현상학적 접근법에 따라 개발된 2상 압력강하 모델이다[9].

이 중 경험적 방법에 대해 연구된 상황으로는 기체상과 액체상에서 단일 과정을 통해 수행된 실험적 결과를 토대로 제안한 마찰 승수(multiplier)를 곱함으로써 계산되는 마찰손실에 대한 압력강하를 예측한 연구가 있다[10]. 또한 마찰손실 압력 강하에 대해서 넓은 범위의 운전조건에 적용할 수 있는 실험적 방법이 개발되었으며[11] 유체의 물성 및 배관의 운전조건으로 제안된 5가지의 무 차원 항으로 구성된 마찰 승수를 이용한 마찰 압력강하 모델이 제안되었다[12]. 냉매에 대해 적용할 수 있는 마찰 압력강하가 설계되었다[13]. 균질 모델을 보완함으로써 분리 유동에서 마찰 압력강하 연구 결과가 있으며[14], 액체상과 기체 상 흐름에서 실험적 보간법을 통한 마찰 압

력강하가 연구가 수행된 바 있다[15].

현상학적 접근법을 토대로한 연구는 이론적 기반 유동 패턴에 의존하는 계산 방법이 제안되며, 단상 유동에 사용한 것과 같은 형태의 계산 방법을 제공하기 위해 유동 패턴영향이 존재하는 기존의 압력강하 혼합 길이 이론 모델을 적용한 연구 결과가 보고되었다[16]. 또한 압력 강하가 환상 유동 영역, 성층 유동 영역 및 천이 유동 영역에서 주로 계산된다고 가정하여 환상 유동 체제와 성층 유동 체제에 대한 마찰 압력강하를 계산하기 위한 반복적 절차에 관한 사례연구가 수행되었다[17]. 수평 2상 유동에서 두 개의 극단적으로 다른 유동 체제가 존재한다는 사실에 기초해 일반적인 상관관계가 제시된 모델이 있으며[18], 가스 액관에서 액체 체류로 인한 마찰 압력 강하의 값을 계산하기 위해서 ARS(Apparent Rough Surface) 현상학적 모델이 소개된 바 있다[19].

앞서 언급된 여러 마찰 압력강하 중 균질 모델, Friedel, Lockhart-Martinelli, Muller-Steinhagen & Heck의 상관관계 모델의 계산 정확성을 평가한 연구결과가 있다[20]. 또한 CO의 단일 모세관 흐름의 2상 유동에 대해 균질 유동과 분리 유동 모델을 사용하여 두 가지의 모델 모두 합리적인 결과를 도출한 연구가 보고되었다[21]. 언급된 연구로 여러 모델을 통한 각 계산 조건마다 2상 유동의 조건에 따른 결과 값에 많은 오차가 발생할 가능성이 있으며, 2상 유동의 복잡성을 고려하였을 때 조건에 따라 신뢰할 수 있는 모델의 선정이 중요한 부분이다.

본 연구에서 단상 및 2상에서 소프트웨어 개발을 위해 단상 유동의 경우 비압축성 유체에 대한 베르누이 방정식을 활용한 이론적 설계를 하였으며[2,3] 배관에 대한 적절한 가정으로 식을 간편화 하였다. 2상의 유동의 경우에는 널리 통용되는 계산 모델인 균질 유동 모델, 분리 유동 모델에 대한 수식을 활용하였다[22]. 소프트웨어는 단상, 2상 유동 계산의 주요 변수인 압력강하, 유속, 배관 지름을 각각 계산하도록 개발되었으며 여러 배관에 대한 데이터베이스를 확보하여, 배관 규격의 가격을 예측할 수 있는 시스템을 구축하였다. 사용자는 유체의 물성, 운전조건 등을 입력해 원하는 주요변수를 계산할 수 있으며, 이를 통한 세 가지 주요변수의 계산과정에서의 상관관계를 제시하였다.

2. 계산 알고리즘

2-1. 유동 유동에 따른 계산 유형 분류

단상과 2상 유동 배관에서 계산되는 주요 변수는 압력강하, 유속 및 배관 지름 이 있다.본 장에서는 단상과 2상의 압력강하, 유속 및 배관 지름의 계산을 위한 이론적 배경 및 알고리즘에 대하여 알아본다. 배관 내 유동 유동의 문제는 다음의 3가지 *type*으로 구분할 수 있다.

- *Type 1* : Calculate pressure drop: p_{out}
- *Type 2* : Calculate flow rate: \dot{Q}
- *Type 3* : Calculate diameter: D

Table 1. Required variables for hydraulic calculation

| Type | Single Phase flow | Homogeneous two-phase flow | Separated two-phase flow |
|------|--|---|---|
| 1 | $p_{in}, L, D, v, \alpha, \rho, \mu, \epsilon$ | $\dot{m}, D, \rho_L, \rho_G, \mu_L, \mu_G, x, L, \alpha$ | $\dot{m}, D, \rho_L, \rho_G, \mu_L, \mu_G, \sigma, x_{in}, x_{out}, L, \alpha$ |
| 2 | $p_{in}, p_{out}, L, D, \alpha, \rho, \mu, \epsilon$ | $\Delta p_{total}, D, \rho_L, \rho_G, \mu_L, \mu_G, x, L, \alpha$ | $\Delta p_{total}, D, \rho_L, \rho_G, \mu_L, \mu_G, \sigma, x_{in}, x_{out}, L, \alpha$ |
| 3 | $p_{in}, p_{out}, L, v, \alpha, \rho, \mu, \epsilon$ | $\Delta p_{total}, \dot{m}, \rho_L, \rho_G, \mu_L, \mu_G, x, L, \alpha$ | $\Delta p_{total}, \dot{m}, \rho_L, \rho_G, \mu_L, \mu_G, \sigma, x_{in}, x_{out}, L, \alpha$ |

서론에서 언급된 바와 같이 2상 유동의 해석을 위해 2상 균질 유동 모델과 분리 유동 모델이 사용되며, 3가지 해석모델에 따라 필요한 입력변수에 대하여 Table 1에 나타냈다. 이 때 주어지는 변수는 Table 1에 나타난 바와 같다.

배관 유동 변수의 계산을 위해 다음과 같은 가정이 사용되었다.

1. 배관 내 유체 온도는 일정하며 단상, 균질 유동의 경우 이동간

Table 2. Mathematical formulas for single phase model

| Relevant equations | |
|--|------------------------|
| Single Phase | |
| $\frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta z + h_L + h_p = 0$ | (1) |
| $\rho_{in} v_{in} A_{in} = \rho_{out} v_{out} A_{out}$ | (2) |
| $h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$ | (3) |
| $Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$ | (4) |
| $f = \frac{16}{Re}$ | (5) For laminar flow |
| $\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{1.26}{Re\sqrt{f}}\right)$ | (6) For turbulent flow |

Table 3. Mathematical formulas for homogeneous two phase model

| Relevant equations | |
|--|------|
| Homogeneous two-phase flow | |
| $\mu_{tp} = x\mu_G + (1-x)\mu_L$ | (7) |
| $Re = \frac{\dot{m}_{total} d_i}{\mu_{tp}}, \dot{m}_{total} = \frac{4\dot{m}}{\pi d^2}, f_{tp} = \frac{0.079}{Re^{0.25}}$ | (8) |
| $\varepsilon_H = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_G (1-x) \rho_G}{u_L x \rho_L}\right)}$ | (9) |
| $\rho_{tp} = \rho_L (1 - \varepsilon_H) + \rho_G \varepsilon_H$ | (10) |
| $\Delta p_{static} = \rho g H \sin \theta$ | (11) |
| $\Delta p_{frict} = \frac{2 f_{tp} L \dot{m}_{total}^2}{d_i \rho_{tp}}$ | (12) |
| $\Delta p_{mom} = 0$ | (13) |
| $\Delta p_{total} = \Delta p_{static} + \Delta p_{mom} + \Delta p_{frict}$ | (14) |
| $\dot{m} = \left(\frac{(\Delta p_{total} - \Delta p_{static}) d^{4.75} \rho_{tp}}{0.241127 L \mu_{tp}^{0.25}} \right)^{0.57}$ | (15) |
| $D = \left(\frac{0.2411 \dot{m}^{1.75} \mu_{tp}^{0.25} L}{\rho_{tp} (\Delta p_{total} - \Delta p_{static})} \right)^{0.21}$ | (16) |

Table 4. Mathematical formulas for separated two phase model

| Relevant equations | |
|--|------|
| Separated two-phase flow | |
| $\mu_{tp} = x\mu_G + (1-x)\mu_L$ | (17) |
| $Re = \frac{\dot{m}_{total} d_i}{\mu_{tp}}, \dot{m}_{total} = \frac{4\dot{m}}{\pi d^2}, f_{tp} = \frac{0.079}{Re^{0.25}}$ | (18) |
| $\varepsilon = \left[1 + \frac{1-x}{x} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{2.3} \right]^{-1}$ | (19) |
| $\rho_{tp} = \rho_L (1 - \varepsilon) + \rho_G \varepsilon$ | (20) |
| $\Delta p_{static} = \rho g H \sin \theta$ | (21) |
| $\Delta p_{mom} = \dot{m}_{total}^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L (1-\varepsilon)} + \frac{x^2}{\rho_G \varepsilon} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L (1-\varepsilon)} + \frac{x^2}{\rho_G \varepsilon} \right]_{in} \right\}$ | (22) |
| $E = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_L f_G}{\rho_G f_L}$ | (23) |
| $F = x^{0.78} (1-x)^{0.224}$ | (24) |
| $H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.7}$ | (25) |
| $Fr_H = \frac{\dot{m}_{total}^2}{gd \rho_{tp}^2}$ | (26) |
| $We_L = \frac{\dot{m}_{total}^2 d}{\sigma \rho_H}$ | (27) |
| $\Delta p_L = 4 f_L (L/d) \dot{m}_{total}^2 (1/2\rho_L)$ | (28) |
| $\Phi_{fr}^2 = E + \frac{3.24FH}{Fr_H^{0.045} We_L^{0.035}}$ | (29) |
| $\Delta p_{frict} = \Delta p_L \Phi_{fr}^2$ | (30) |
| $\Delta p_{total} = \Delta p_{static} + \Delta p_{mom} + \Delta p_{frict}$ | (31) |

추가적인 상변화가 수반되지 않는다. 한편 분리 유동의 경우는 이동간 추가적인 상변화가 수반됨을 가정한다.

2. 배관 지름은 일정하며 정상상태를 유지한다. 따라서 입구와 출구에서 등속을 유지한다.

3. 동일한 유체가 등온과정으로 이동하므로 입구와 출구에서 같은 밀도를 유지한다.

4. 입구와 출구는 다른 높이 가질 수 있으며, 유체의 유동은 중력의 영향을 받는다.

5. 외부의 동력은 작용하지 않는다.

이와 같은 가정을 기반으로 3가지 배관 유동 모델에서 사용되는 수식을 Table 2-4에 나타냈다.

압력강하를 구하는 Type 1의 경우, 레이놀즈 수 및 압력강하를 구하는데 요구되는 모든 변수의 값을 알 수 있는 반면, 유속과 배관 지름을 구하는 Type 2와 Type 3의 경우 수식의 우변항에 미지수를 포함하고 있어 직접 계산이 불가능하게 된다. 이와 같은 특성은 문제

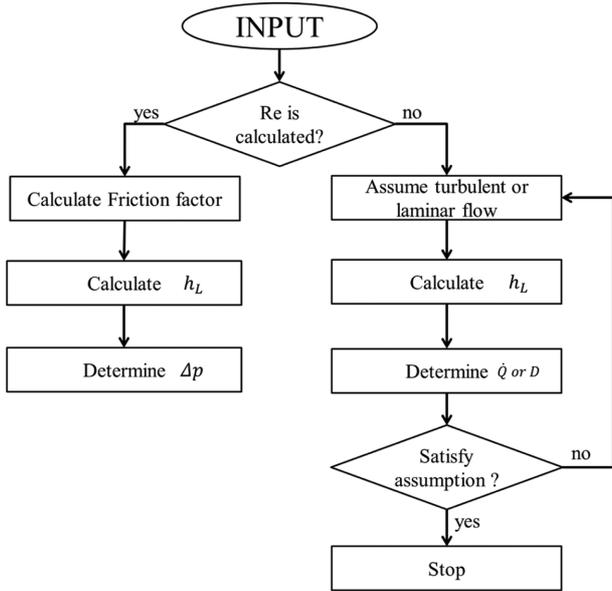


Fig. 1. Calculation flow chart for single phase hydraulics.

해법을 위한 알고리즘에 커다란 영향을 주게 되며, 반복계산을 통한 수치해석의 방법으로 해를 구하게 된다.

2-2. 유형 별 계산 알고리즘

Type 1은 수식에 따라 압력강하를 구하기 위한 변수를 대입하여 계산을 할 수 있다. 그러나 Type 2와 Type 3의 문제 해법을 위해서는 압력강하에 대한 수식에서 우측항의 미지수를 가정 한 후 이에 대한

Table 5. Algorithms to calculate pressure drop, velocity and diameter for single phase

| | |
|---|------------------------|
| Type 1: Algorithm to calculate pressure drop | |
| Step 1. Calculate Re | |
| Step 2. Calculate | |
| $f = \frac{16}{Re}$ | (6) For laminar flow |
| $\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{1.26}{Re\sqrt{f}}\right)$ | (7) For turbulent flow |
| Step 3. Calculate h_L | |
| Step 4. Determine Δp_{total} | |
| Type 2 & 3: Algorithm to calculate velocity or diameter | |
| Step 1. Assume flow regime (turbulent or laminar) | |
| Step 2. Calculate h_L | |
| Step 3. Calculate v (or D) with | |
| $f = \frac{16}{Re}$ | (6) For laminar flow |
| $\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{1.26}{Re\sqrt{f}}\right)$ | (7) For turbulent flow |
| Step 4. Check Re with predicted v | |
| If predicted Re satisfies the assumed Re stop | |
| Else assume the opposite flow and go to Step 3 | |

방정식을 세워 해를 구한 후 이를 가정과 다시 비교하여 옳은 해를 구할 때까지 반복 계산을 수행하게 된다. 이와 같은 알고리즘은 단상 유동, 분리 2 상 유동에 대해서 적용되며, 균질 2 상 유동은 유속과 배관 지름에 대하여 직접계산이 가능하기 때문에 이와 같은 알고리즘을 적용하지 않는다.

2-2-1. 단상 유동

단상 유동과 관련된 주요 변수의 계산 흐름도를 Fig. 1에 나타냈으며 앞서 언급한 Type 1, 2, 3에 대한 계산 절차를 Table 5에 나타냈다. Type 2,3의 경우 헤드손실과 마찰계수의 수식을 이용하여 방정식을 세우고 이를 수치해석 기법을 사용하여 근을 구해 가정한 유동(층류 또는 난류)에 대한 검증을 하는 알고리즘이다. 또한 단상에서 난류의 경우 주요변수 계산에 중요 요소인 마찰계수 산출은 다음 세 가지 과정을 따른다.

1. Moody Chart의 배관 재질에 따른 거칠기(Roughness)를 참고
2. 마찰계수는 배관의 거칠기(Roughness) 및 레이놀즈 수의 함수인 Colebrook equation을 통해 구한다.

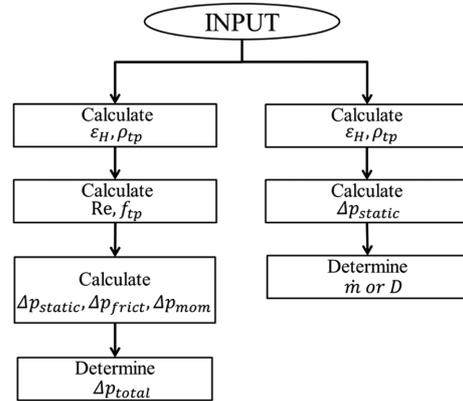


Fig. 2. Calculation flow chart for homogenous two phase hydraulics.

Table 6. Algorithms to calculate pressure drop, velocity and diameter for homogeneous two phase flow

| | |
|--|------|
| Type 1: Algorithm to calculate pressure drop | |
| Step1. Calculate ϵ_{tp}, ρ_{tp} | |
| Step2. Calculate Re, f_{tp} | |
| Step3. Calculate $\Delta p_{static}, \Delta p_{frict}, \Delta p_{mom}$ | |
| Step4. Determine $\Delta p_{total} = \Delta p_{static} + \Delta p_{mom} + \Delta p_{frict}$ (14) | |
| Type 2 & 3: Algorithm to calculate mass flow rate or diameter | |
| Step1. Calculate $\epsilon_{tp}, \rho_{tp}, \Delta p_{static}$ | |
| Step2. Determine | |
| $\dot{m} = \left(\frac{(\Delta p_{total} - \Delta p_{static}) d^{4.75} \rho_{tp}}{0.241127 L \mu_{tp}^{0.25}} \right)^{0.57}$ | (15) |
| $D = \left(\frac{0.2411 \dot{m}^{1.75} \mu_{tp}^{0.25} L}{\rho_{tp} (\Delta p_{total} - \Delta p_{static})} \right)^{0.21}$ | (16) |

3. 앞서 구한 마찰계수를 Moody Chart 의 레이놀즈 수 와 배관의 거칠기를 이용해 검증한다.

2-2-2. 균질 2 상 유동

균질 2 상 유동과 관련된 주요 변수의 계산 흐름도를 Fig. 2에 나타냈으며, 이에 대한 알고리즘을 Table 6로 확인할 수 있다. 단상, 분리 유동과는 달리, 균질 유동의 경우 Type1,2,3 주요변수 세가지에 대한 방정식을 풀지않고도 근을 구할 수 있는 비교적 간단한 형태의 수식이므로 근을 구함에 수치해석 기법을 적용하지 않았다.

2-2-3. 분리 2 상 유동

분리 2 상 유동과 관련된 주요 변수의 계산 흐름도를 Fig. 3에 나타냈으며, 이에 대한 알고리즘을 Table 7로 확인할 수 있다. 분리 유동의 마찰 압력강하를 예측하기 위해 경험적 방법을 토대로 제시된 모델 중 Friedel의 상관관계를 사용하였다. 분리 유동 계산흐름은 Type2,3에서 단일상 알고리즘과 유사한 기법을 사용한다. 즉, 전체 압력에 대한 함수의 운동량압력강하와 마찰압력강하의 수식을 식 (34-35)와 같이 유속 및 배관 지름의 함수로 표현한 후 구하고자 하는 변수에 대한 방정식을 세운다. 이후의 과정은 수치해석기법을 적용한 방정식의 해석을 통해 주요변수를 계산하게 되는 알고리즘의 양상을 나타낸다.

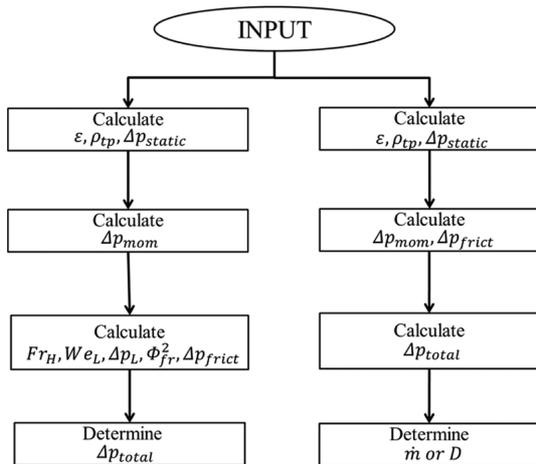


Fig. 3. Calculation flow chart for separated two phase hydraulics.

Table 7. Algorithm to calculate pressure drop, flow rate and diameter for separated two phase flow

| | |
|---|---|
| Type 1: Algorithm to calculate pressure drop | |
| Step1. Calculate | $\epsilon, \rho_{tp}, \Delta p_{static}$ |
| Step2. Calculate | Δp_{mom} |
| Step3. Calculate | $Fr_H, We_L, \Delta p_L, \Phi_{fr}^2, \Delta p_{frict}$ |
| Step4. Determine | $\Delta p_{total} = \Delta p_{static} + \Delta p_{mom} + \Delta p_{frict}$ (32) |
| Type 2 & 3: Algorithm to Calculate mass flow rate or diameter | |
| Step1. Calculate | $\epsilon, \rho_{tp}, \Delta p_{static}$ |
| Step2. Calculate | $\Delta p_{mom}, \Delta p_{frict}$ |
| Step3. Calculate total pressure drop: | $\Delta p_{total} = \Delta p_{static} + \Delta p_{mom} + \Delta p_{frict}$ (32) |
| Step4. Determine mass flow rate or diameter | $\left\{ \Delta p_{mom} = \frac{16\dot{m}^2}{\pi^2 D^5} \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L(1-\epsilon)} + \frac{x^2}{\rho_v \epsilon} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_L(1-\epsilon)} + \frac{x^2}{\rho_v \epsilon} \right]_in \right\} \right.$ $\left. \Delta p_{frict} = \frac{E}{D^{4.75}} \dot{m}^{1.75} + \left(\frac{0.83298 \rho_H^{0.125} \sigma^{0.035} \mu_{gr}^{0.25} FHL}{\rho_L D^{4.42}} \right) \dot{m}^{1.59} \right.$ (34) (35) |

3. 소프트웨어 구조 및 사용자 인터페이스

3-1. 소프트웨어 구조 및 모듈

배관 유동 주요변수 계산을 위한 소프트웨어는 Window platform을 바탕으로 개발되었으며 Visual studio C#을 개발언어로 사용하였으며, GUI를 통하여 사용자의 편의성을 최대화할 수 있도록 개발하였다. 소프트웨어는 1) 입력 모듈(Input module), 2) 계산 모듈(Calculation module), 3) 배관 라이브러리 모듈(Pipe library module), 4) 출력 모듈(Output module) 로 구성되어 있으며 전체 소프트웨어의 구조는 Fig. 4에 나타난 바와 같다.

3-1-1. 입력 모듈(Input module)

사용자 인터페이스 통해 배관 계산을 위한 입력 조건을 받아들이며 이를 Calculation module 로 보내게 된다. 입력되는 내용은 운전

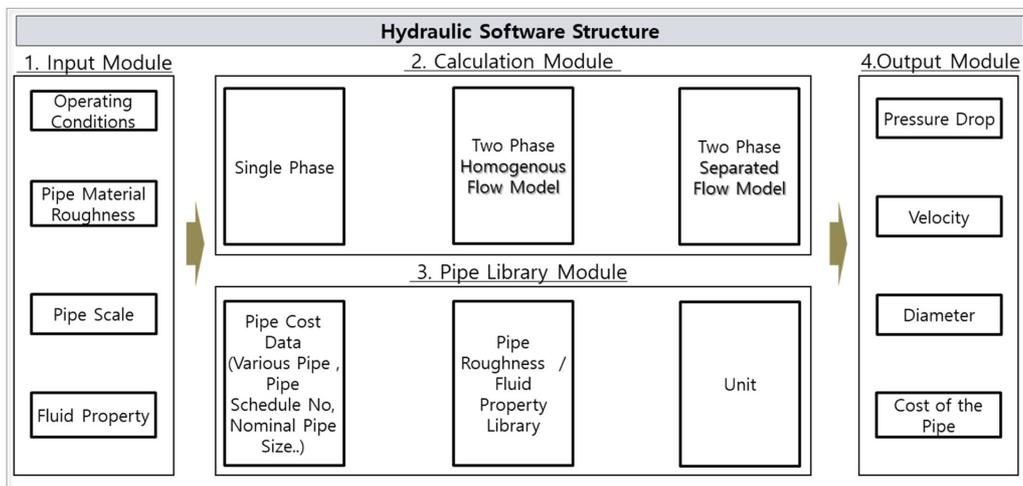


Fig. 4. Software Structure for pipe hydraulic calculation for single and two phase flow.

조건, 유체물성, 배관 재질 및 규격으로 나눌 수 있다. Input module 을 통한 입력은 사용자가 직접 입력하는 user defined mode와 메뉴 를 통해 라이브러리를 이용하는 library mode 로 나누어진다.

- 운전조건 : 배관 유동에 따라 결정되는 운전조건으로 입/출력 부위 압력, 유속, 배관 지름, 배관 경사각, 기상/액상의 품질을 이용한다.
- 유체의 물성 : 각 유체마다 가지고 있는 고유한 성질인 밀도(기체 상, 액체상, 단상), 점도, 표면장력 등이 배관 유동에 사용된다.
- 배관 재질 : 난류의 유동에서 마찰 계수를 구하기 위해 배관의 재 질에 따른 거칠기(ϵ)를 이용하며, 2 상 유동 모델의 경우 배관 내부 표면 거칠기에 대한 변수를 사용하지 않으며 단상의 경우만 필요 하다.
- 배관 규격 : 사용자는 배관 규격을 결정짓는 요소인 스케줄 번호와 공칭경을 선택할 수 있다. 스케줄 번호(Schedule Number)는 배 관 두께에 관련된 요소이며 배관의 외경은 공칭경(Nominal Pipe Size, NPS)을 통해 알 수 있다.
- 유체, 배관의 종류 : 라이브러리를 제공하는 유체 및 배관의 종류는 다음과 같다.
 - 유체 : Water, Air, Gasoline, Kerosene, LPG, Methane, Ethane
 - 배관 : stainless Steel 316 Seamless, Copper, PVC, ABS, Brass, Aluminum, Galvanized Steel, Black Steel

3-1-2. 계산 모듈(Calculation module)

Calculation module은 2 장에서 언급한 단상, 2 상 유동에 대한 수 식과 알고리즘을 포함하고 있으며, 개발된 소프트웨어의 중심에 해 당하는 모듈이다. Input module 로부터 계산을 위한 입력 값을 받아 계산을 수행한 후 Output module로 결과를 보내게 된다. 계산 중 필 요한 자료는 Pipe library module에 수록된 정보를 받아 수행하게 되며, 내부 수식 알고리즘 계산을 위해 Newton's Method를 사용하였다.

3-1-3. 배관 라이브러리 모듈(Pipe library module)

사용자의 편의를 위하여 소프트웨어에는 배관 관련 라이브러리가 내장되어 있다. 주요 라이브러리의 목록은 다음과 같다.

- 유체의 물성 : 물, 공기, 가솔린, 등유 등의 유체 밀도, 점도, 표면 장력에 대한 물성 라이브러리를 구축하였다.
- 배관 거칠기 : Moody Chart의 배관 종류에 따른 재질을 활용해 거칠기(roughness) 자료를 구축하였다[23].
- 배관 비용 : 사용자는 배관 재질을 고른 후 규격 결정을 위해 스 케줄번호, 공칭경을 선택해 배관 규격과 거리당 비용을 알 수 있 다. 배관 비용에 대한 자료는 Hi-Tech Metal and Tubes[24], Global Technology and Engineering[25], W.W.그레인저[27] 등의 회사에서 사용하고 있는 거리당 비용에 대해 활용하였다[24-27].
- 단위 : 사용자 편의에 따른 단위 체계 (국제단위-SI unit 또는 영 국공학 단위-English unit)를 선택할 수 있다.

3-1-4. 출력 모듈(Output module)

Calculation module을 통해 계산된 값을 보여주는 module로 출력 의 배관 유동에 대한 압력강하, 유체의 속력, 배관 지름, 배관 비용 등이 있다. 또한 배관의 재질 및 규격에 따라 달라지는 Cost Data 는 Table 8과 같다.

3-2. 소프트웨어 사용자 인터페이스

소프트웨어의 첫 화면 및 내부 인터페이스는 Fig. 5(a),(b),(c),(d) 와 같으며, 사용자가 선택한 조건에 따라 각 변수의 계산결과를 확 인할 수 있다.

4. 실증적 예제 수행 결과

본 연구를 통하여 개발된 소프트웨어의 효용성과 정확도를 2 종 류 예제를 통하여 검증하였다. 첫 번째 예제는 배관 유동 계산과 관 련하여 문헌상에 보고된 내용이며, 두 번째 예제는 실제 수행된 프 로젝트의 일부분을 발췌하여 사용하였다.

4-1. 문헌 상 보고된 자료를 통한 검증

문헌에 보고된 단상 유동[28], 균질 2 상 유동[4], 분리 2 상 유동 [29]에 대한 예제를 사용하여 소프트웨어의 정확도를 검증하였으며 수행된 결과는 Table 6 에 나타났다. Table 9 에 나타난 바와 같이 최 대 오차 3.8%, 최소 오차 0.1% 로 개발된 소프트웨어의 정확도를 확 인할 수 있었다.

4-2. 실 공정 자료를 통한 검증

LPG 공정은 원료로부터 메탄, 에탄, 프로판, 부탄을 증류함으로써 회수하는 공정이다. LPG공정의 원료는 주로 가스분리기를 통해 생성된 가스에서 질소, 산소, 이산화탄소, 황화수소 등 불순물이 탈 수 및 수은 제거층을 거쳐 처리된 응축 및 산성수 등을 포함한 가스 가 원료로 사용된다. 본 공정의 주요 장치로는 펌프, 배관, 팽창기, 열 교환기, 여과기 등이 있다. Fig. 6는 원료물질의 투입부터 메탄 회 수를 위한 증류탑까지의 공정 모사도를 나타낸다. 해당 공정은 프로 판 냉매를 통해 원료 가스가 약 -70 °C의 저온이 되며, 저온 가스는 팽창기를 통해 다시한번 온도가 감소하며 운전된다. 동시에 팽창기 를 통해 원료 가스에서의 메탄은 가스 상태를 유지하며 탄화수소를 응축시킨다. 또한 각 공정에서 회수되는 탄화수소와 프로판은 공급 단으로 유입되며 재순환되는 시스템이다.

LPG 공정은 단위공정 혹은 전체공정에 해당하는 수 많은 배관이 존재하며, 이에 따라 배관의 지름을 결정하는 것이 중요한 요소가 될 수 있다. 본 연구에서 배관 지름을 계산하기 위해 원료물질로부 터 메탄회수 증류탑까지 존재하는 배관을 대상으로 개발된 소프트 웨어를 적용 및 검증하였다. 계산된 결과는 실 공정의 배관 지름과

Table 8. Cost data for various material

| Material | Schedule Number | Nominal Pipe Size |
|------------------------------|-----------------|--|
| Stainless Steel 316 Seamless | 5, 10, 40, 80S | 1/4, 3/8, 1/2, 3/4, 1, 1 1/4, 1 1/2, 2, 2 1/2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14 |
| M,L Type Copper | | 1/2, 3/4, 1, 1 1/4, 1 1/2, 2, 2 1/2, 3, 4 |
| PVC | 40, 80S | 1/2, 3/4, 1, 1 1/4, 1 1/2, 2, 2 1/2, 3, 4, 6 |
| Aluminum | 5, 10, 40S | 1 1/2, 2, 2 1/2, 3, 3 1/2, 4, 5, 6, 8 |
| Galvanized Steel | 40S | 1/2, 3/4, 1, 1 1/4, 1 1/2, 2, 2 1/2, 3, 4 |
| Black Steel | 40, 80, 160S | 1/2, 3/4, 1, 1 1/4, 1 1/2, 2, 2 1/2, 3, 4 |

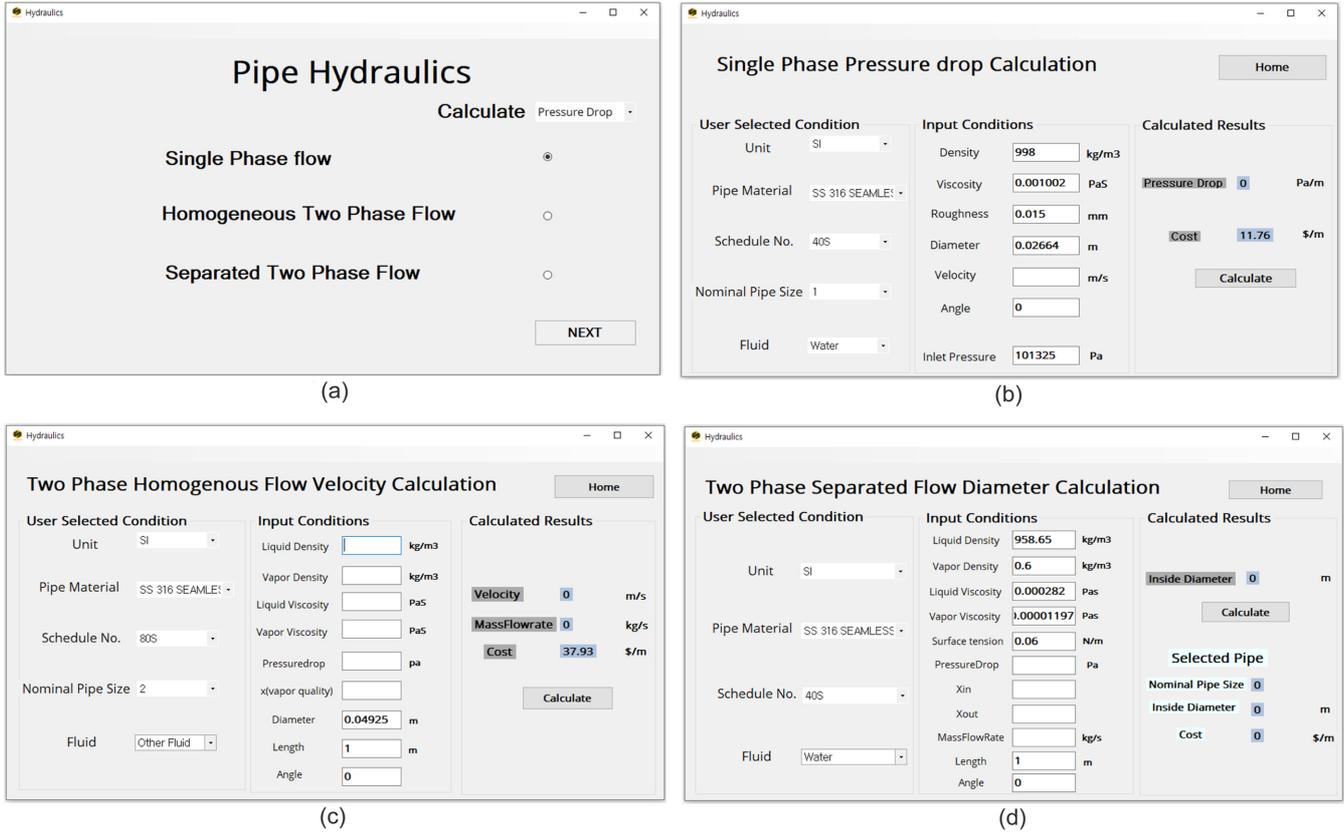


Fig. 5. Software Interface; (a) Main menu, (b) Pressure drop calculation for single phase flow, (c) Velocity calculation for homogeneous two phase flow, (d) Diameter calculation for separated two phase flow.

Table 9. Calculation result of the examples for single and two phase flow

| Model | Example Calculation Result (Reference Value/Calculated Value) | | | | | | |
|-------------------|---|---------|----------------|-----------|--------------|-------|-----------|
| | Pressure Drop (Pa) | | Velocity (m/s) | | Diameter (m) | | Error (%) |
| Single Phase | 265000 | 280421 | 6.4 | 6.47 | 0.2 | 0.21 | 3.8 |
| Single Phase | 74556 | 71473.3 | 4.84 | 4.93 | 0.3 | 0.31 | 3.1 |
| Homogeneous Model | 5940 | 5950.8 | 5.065 | 5.056 | 0.01 | 0.01 | 0.1 |
| Separated Model | 16182 | 16186.7 | 0.0402 kg/s | 0.04 kg/s | 0.016 | 0.016 | 0.2 |

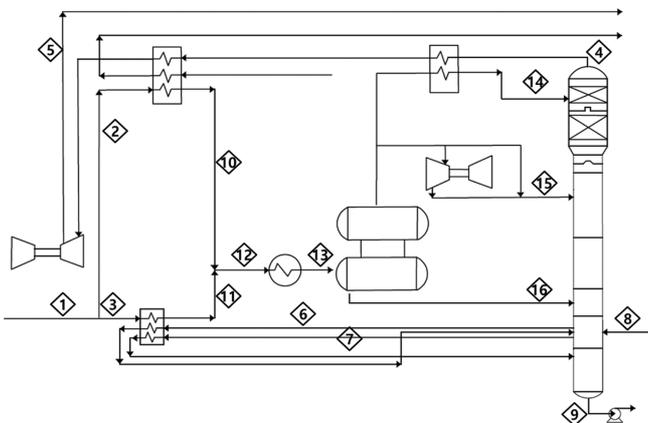


Fig. 6. Simplified PFD for pipe hydraulic calculation from LPG process (single phase: 1-9, two phase: 10-16) [30].

비교하였으며, Table 10에서 계산된 결과와 실제 결과를 비교하였다. 비교를 통하여 단일 상은 0.75% 2 상은 8.88%의 오차를 보임을 알

수 있었다. 단일 상에 비해 2 상의 경우 더 큰 오차를 보이는 것은 실제 공정의 건설 시 온도 변화 등에 의한 상 변화 및 기타 안전요소 (safety factor)를 고려하여 약간의 여유(margin)를 두는 것이 일반적인 관행이며, 이러한 요소가 오차의 주요 원인으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 배관 내 유체의 유동으로 인한 압력강하, 유속, 배관 지름을 계산하며 배관 규격에 따른 비용을 확인할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 소프트웨어는 Visual studio C# window form을 통해 사용자 인터페이스 및 내부 코딩을 설계하였으며 배관 유동 계산 및 비용 예측에 필요한 라이브러리를 구축해 계산과정의 편의를 제공하였다.

배관 내 흐름 계산에 관한 문제를 3 개의 유형으로 분류하고 각각에 대한 수학적 모델 및 계산 알고리즘을 제시하여 계산 방법의 정당성을 확인하였다. 또한 배관의 유동은 단상과 2 상 유동으로 분류되며 단상의 경우 베르누이 이론, 2 상의 경우 균질 유동, 분리 유동

Table 10. LPG Process Diameter Calculation Results

| Target Process Diameter Calculation Results | | | | |
|---|--------------|----------------------------|------------------------|-----------|
| Line num | Phase | Calculated Diameter (inch) | Actual Diameter (inch) | Error (%) |
| 1 | Single Phase | 29.13 | 29.25 | 0.4 |
| 2 | Single Phase | 19.17 | 19.25 | 0.41 |
| 3 | Single Phase | 23.11 | 23.27 | 0.68 |
| 4 | Single Phase | 13.07 | 13.27 | 1.48 |
| 5 | Single Phase | 35.08 | 35.24 | 0.45 |
| 6 | Single Phase | 23.42 | 23.27 | 0.68 |
| 7 | Single Phase | 1.04 | 1.06 | 1.85 |
| 8 | Single Phase | 7.98 | 7.99 | 0.1 |
| 9 | Single Phase | 23.42 | 23.27 | 0.68 |
| 10 | Two Phase | 11.36 | 13.27 | 14.36 |
| 11 | Two Phase | 23.31 | 23.27 | 0.17 |
| 12 | Two Phase | 7.09 | 10.04 | 29.41 |
| 13 | Two Phase | 21.65 | 23.27 | 6.94 |
| 14 | Two Phase | 12.52 | 13.27 | 5.64 |
| 15 | Two Phase | 22.05 | 23.27 | 5.24 |
| 16 | Two Phase | 23.18 | 23.27 | 0.39 |
| Single phase error rate (%) | | 0.75 | | |
| Two phase error rate (%) | | 8.88 | | |

모델을 사용하였다. 특히 2 상의 경우 사용자는 입력자료가 충분하지 않을 때 균질 유동 모델을 사용할 수 있으며, 충분한 입력자료가 있을 때 분리 유동 모델을 사용하여 보유한 자료에 따라 용이한 계산을 하도록 설계하였다. 이를 통해 사용자는 유동 양식에 대해 판단된 상태 혹은 이에 대한 가정을 통하여 각 조건에 맞는 적절한 모델을 사용하였을 때 높은 정확성의 결과값을 얻을 수 있다.

소프트웨어의 검증을 위해 문헌상의 예제 및 수행된 프로젝트의 LPG 대상공정의 단일상 및 2 상 유동계산을 수행하였으며, 문헌상 예제의 경우 0.1~3.8%, 수행된 프로젝트는 단상의 경우 0.75% 2 상의 경우 8.8%의 오차율을 확인하여 소프트웨어의 정당성을 입증하였다.

개발된 소프트웨어는 사용자의 입력을 통하여 단상 및 2 상에 대한 압력강하, 유속 및 배관 지름에 대한 계산을 손쉽게 정확하게 할 수 있어 화학, 가스, 정유 산업 등 다양한 산업 분야에 적용이 가능하며 공정 설계, 보수 및 개선에 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 엔지니어링핵심기술개발(R&D)사업의 일환으로 수행하였음(10077467, 클라우드 기반 기본설계 및 FEED 자동화 업무지원 시스템 개발).

References

- Cihang Lu, Ran Kong and Shouxu Qiao, Joshua Larimer, Seungjin Kim, Stephen Bajorek, Kirk Tien, Chris Hoxie "Frictional Pressure Drop Analysis for Horizontal and Vertical Air-water Two-phase Flows in Different Pipe Sizes," *Nucl Eng. Des* **332**, 147-148(2018).

- https://en.wikipedia.org/wiki/Bernoulli%27s_principle.
- William M. Deen, "Introduction to Chemical Engineering Fluid Mechanics, Cambridge series in chemical engineering," 1rd ed., *Cambridge Series In Chemical Engineering*, 30-46(2016).
- Yin, J. M., Bullard, C. W. and Hrnjak, P. S., "Single-Phase Pressure Drop Measurements in a Microchannel Heat Exchanger," *Heat Transfer Eng.*, **23**, 3-12(2002).
- Ali Celen, Ahmet Selim Dalkilic and Somchai Wongwises, "Experimental Analysis of the Single Phase Pressure Drop Characteristics of Smooth and Microfin Tubes," *Int. J. Heat Mass Tranf*, **46**, 58-66(2013).
- Awad, M. M. and Muzychka, Y. S., "Effective Property Models for Homogeneous Two-phase Flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, **33**, 106-108(2008).
- Hamad, F. A., Faraji, F., Santim, C. G. S., Basha, N. and Ali, Z., "Investigation of Pressure Drop in Horizontal Pipes with Different Diameters," *Int. J. Multiphase Flow*, **91**, 120-128(2017).
- Lee, S., Hong, S.-H. and Lee, J. N. and Lee, S. W., "A Study on 2-Phase Flow in the LNG Pipeline," *The Korean Institute of Gas* 153-154(1998).
- J Mreno Quiben "Experimental and Analytical Study of Two-phase Pressure Drops During Evaporation in Horizontal Tubes," Lausanne, EPFL (2005).
- Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C., "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-phase, Two-component Flow in Pipe," *Chem. Eng. Prog.*, **45-1**, 39-48(1945).
- Chisholm, D., "Pressure Gradients Due to Friction during the Flow of Evaporating Two-Phase Mixtures in Smooth Tubes and Channels," *Int. J. Heat Mass Tranf*, **16**, 347-358(1973).
- Friedel, L., "Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-Phase Pipe Flow," European Two-phase Flow Group Meeting, Ispra, Italy, June, Paper E2(1979).
- Gronnerud, R., "Investigation of Liquid Hold-up, Flow-resistance and Heat Transfer in Circulation Type of Evaporators, Part iv: Two-phase Flow Resistance in Boiling Refrigerans," *Bull.de l'Inst.du Froid*, 127-138(1979).
- Bankoff, S. G., "A Variable Density Single-Fluid Model for Two-Phase Flow with Particular Reference to Steam-Water Flow," *J. Heat Transfer*, **82**(4), 265-272(1960).
- Muller-Steinhagen, H. and Heck, K., "A Simple Friction Pressure Correlation for Two-phase Flow in Pipes," *Chem. Eng. Process*, **20**, 297-308(1986).
- Beattie, D. R. H. and Whalley, P. B., "A Simple Two-phase Frictional Pressure Drop Calculation Method," *Int. J. Multiphase Flow*, **8**, 83-87(1982).
- Bandel, J., "Druckverlust und Wärmeübergang bei der Verdampfung Siedender Kältemittel im Druchströmten Waagerechten Rohr," *Chemie Ingenieur Technik*, **45**(6), 345-436(1973).
- Olujic, Z., "Predicting Two-phase Flow Friction Loss in Horizontal Pipes," *Chem. Eng. (N.Y)*, **92**(13), 45-50(1985).
- Hart, J., Hamersma, P. J. and Fortuin, J. M. H., "Correlations Predicting Frictional Pressure Drop and Liquid Holdup During Horizontal Gas-liquid Pipe Flow with a Small Liquid Holdup," *Int. J. Multiphase Flow*, **15**, 947-964(1989).
- Hamad, F. A., Faraji, F., Santim, C. G. S., Basha, N. and Ali, Z., "Investigation of Pressure Drop in horizontal pipes with different diameters," *Int. J. Multiphase Flow*, **91**, 120-128(2017).

21. Neeraj Agrawal, Souvik Bhattacharyya, "Homogeneous Versus Separated Two Phase Flow Models: Adiabatic Capillary Tube Flow in a Transcritical CO₂ Heat Pump," *Int J. Therm Sci.*, **47**, 1555-1562(2008).
22. John R. Thome, "Engineering Data Book III" Wolverine Tube, Inc Ch 13.1-10.
23. <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/major-head-loss-friction-loss/relative-roughness-of-pipe/>.
24. <https://www.hitechoverseas.com/jindal-ss-304-pipes-price-list.html>.
25. <https://www.globaltecheng.com/ProductCart/pc/Pipe-c13.htm?pageStyle=l&ProdSort=1&page=25&idCategory=13&SFID=&SFNAME=&SFVID=&SFVALUE=&SFCount=-1&viewAll=yes>
26. <https://www.plumbingsupply.com/copperpipe.html>.
27. <https://www.grainger.com/category/plumbing/pipe-tubing-and-fittings/pipe>.
28. Frank M. White, Fluid Mechanics, 7rd ed. McGraw-Hill, 372-373 ex)6.7, 6.10 (2011).
29. <https://archiveweb.epfl.ch/lcm.epfl.ch/files/content/sites/lcm/files/shared/import/migration/COURSES/TwoPhaseFlowsAndHeatTransfer/Chapter%2013%20Solutions.pdf>.
30. <https://www.slideshare.net/ajaytiwari35574/96326047-process-descriptionoglpgrain4>.