

가스 이송 설비 최적화를 위한 유체 압력 손실 계산

이지수*, 노재철, 정찬설, 이석호

삼성엔지니어링(주)

(jisoo.yi@samsung.com*)

Pressure Drop Calculation for Optimization of Gas Transport Facility

Ji Soo Yi*, Jae Chul Ro, Chan Sul Jung, Seok Ho Yi

Samsung Engineering Co., Ltd.

(jisoo.yi@samsung.com*)

1. 서론

최근 국내외적으로 가스(Gas, Compressible Fluid)를 이송하는 배관들이 광범위하게 설치되면서 이에 필요한 이송 장치 및 배관 설계의 중요성이 다시금 부각되고 있다. 근래에 들어서는 가스 소비량이 급증하면서 단위 생산공장도 대규모화 되는 추세로, 이는 주요 이송 장치인 압축기(Compressor)의 대형화 또는 이송 배관의 대구경화로 연결된다. 압축기의 대형화 또는 이송 배관의 대구경화는 초기 투자비의 급속한 증가를 의미하므로 가스 이송 설비 최적화 설계에 대한 욕구도 한층 커질 수 밖에 없다.

당사에서 장거리 가스 이송 배관에 대한 설계 업무를 수행하던 중, 압력 손실 계산에서 어느 수식을 사용하는가에 따라 그 결과가 크게 달라진다는 사실을 알게 되었다. 즉, 과연 어느 식을 적용했을 때 가장 실제 값에 가깝고 최적화된 배관 설계를 할 수 있는가 하는 문제가 크게 대두된 것이다. 이에 본 연구를 통해 엔지니어링사에서 상용되고 있는 여러 식들을 고찰하고 각 식별 제약점 및 가장 타당한 적용 범위 등을 알아 보고자 한다.

2. 가스 이송 배관의 압력 손실 계산식

배관 내에서 흐르는 유체를 중심으로 한 운동량 수지식은 다음과 같은 가정아래 식(1)로 유도 될 수 있다.

- 1) Newtonian 흐름
- 2) 단일상 유체,
- 3) 정상 상태
- 4) 등온 흐름,
- 5) 외기와의 열 전달 없음,
- 6) 축일 없음

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{g}{g_c} dz + \frac{udu}{g_c} + 2 \frac{f u^2}{d g_c} dL = 0 \quad (1)$$

식 (1)에 다음과 같은 부가적인 가정을 더하면 일반적 압력 손실 계산 식인 식 (2)를 얻을 수 있다[1].

- 7) Kinetic energy 무시,
- 8) Gas 는 이상기체 법칙을 따른다,
- 9) 마찰 계수 f 는 일정하다,
- 10) 수평 배관

$$Q = 38.77 \left(\frac{T_b}{P_b} \right) E \sqrt{\frac{1}{f} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{S L_m T Z} \right)^{0.5}} d^{2.5} \quad (2)$$

식 (2)를 이용한 압력 손실 계산에 있어서 가장 어려운 점은 마찰 계수(friction factor, f)를 어떻게 선정할 것인가 하는 문제이다[2]. 마찰 계수는 관 내 유체 흐름에 의해 발생하는 압력 손실 계산을 위해 도입된 항으로 정확한 압력 손실 예측을 결정하는 주요 변수로, 수식적으로 유추해 낼 수 있는 식을 Colebrook and White[3] 등이 제시한 바 있으며 이 식이 광범위한 범위에서 실험결과와도 잘 부합한다는 사실이 밝혀진 바도 있다[4, 5].

$$f^{-0.5} = -4 \log \left(\frac{\epsilon}{3.7d} + \frac{1.255}{f^{0.5} \text{Re}} \right) \quad , \text{Colebrook and White Eq.} \quad (3)$$

그러나 식(3)은 식의 양변에 마찰 계수 항을 포함하고 있어 그 해를 구하기 어려웠기 때문에 Weymouth(1912), Panhandle A(1940s), Panhandle B(1956), AGA(1965) 등의 간단식이 제안되었으며, 이러한 고전적 식들이 그 이용의 간편성 때문에 지금까지도 많은 엔지니어링사에서 가스 이송 설비의 압력 손실 계산에 이용되고 있다.

Table 1. Comparison table of equations for friction factor prediction

Name	Equation	Neglected Item
Weymouth	$f = 0.008 / d^{1/3}$	Reynolds no., ϵ/d
Panhandle A	$f^{-0.5} = 6.872 (\text{Re})^{0.07305}$	ϵ/D , Viscosity = 0.0105cP
Panhandle B	$f^{-0.5} = 16.49 (\text{Re})^{0.01961}$	ϵ/D , Viscosity = 0.0105cP
AGA	$f^{-0.5} = 4 \log (3.7 d / \epsilon)$	Reynolds no.

Table 1에 보여진 식들은 모두 1960년대 이전에 제안된 비교적 고전적 식들로 그 당시에는 컴퓨터를 비롯한 계산기들이 별로 발달하지 않았던 시기였으므로 식 (3)을 풀기 위해 상당히 간단화 된 모델들을 제안했던 것이며 따라서 각 식별로 몇 가지 변수들이 무시됨에 따라 필연적으로 제약점을 가질 수 밖에 없고 이에 따라 적용 범위도 다를 수 밖에 없다.

2.1 Reynolds no. 및 roughness에 따른 영향 분석

각 식별 Reynolds no. 및 roughness에 따른 영향을 분석하기 위해 식 (3)과 비교한 오차를 Fig.1에 표시하였다. 그 결과, Weymouth 식은 12 inch 이하의 구경에 대해 fully turbulent 한 영역, Panhandle A 식은 12 inch 이상의 구경에서 partially turbulent 한 영역, Panhandle B 는 12 inch 이상의 구경에서 fully turbulent 한 영역, AGA 는 구경에 상관없이 fully turbulent 영역에서 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있음을 볼 수 있었다.

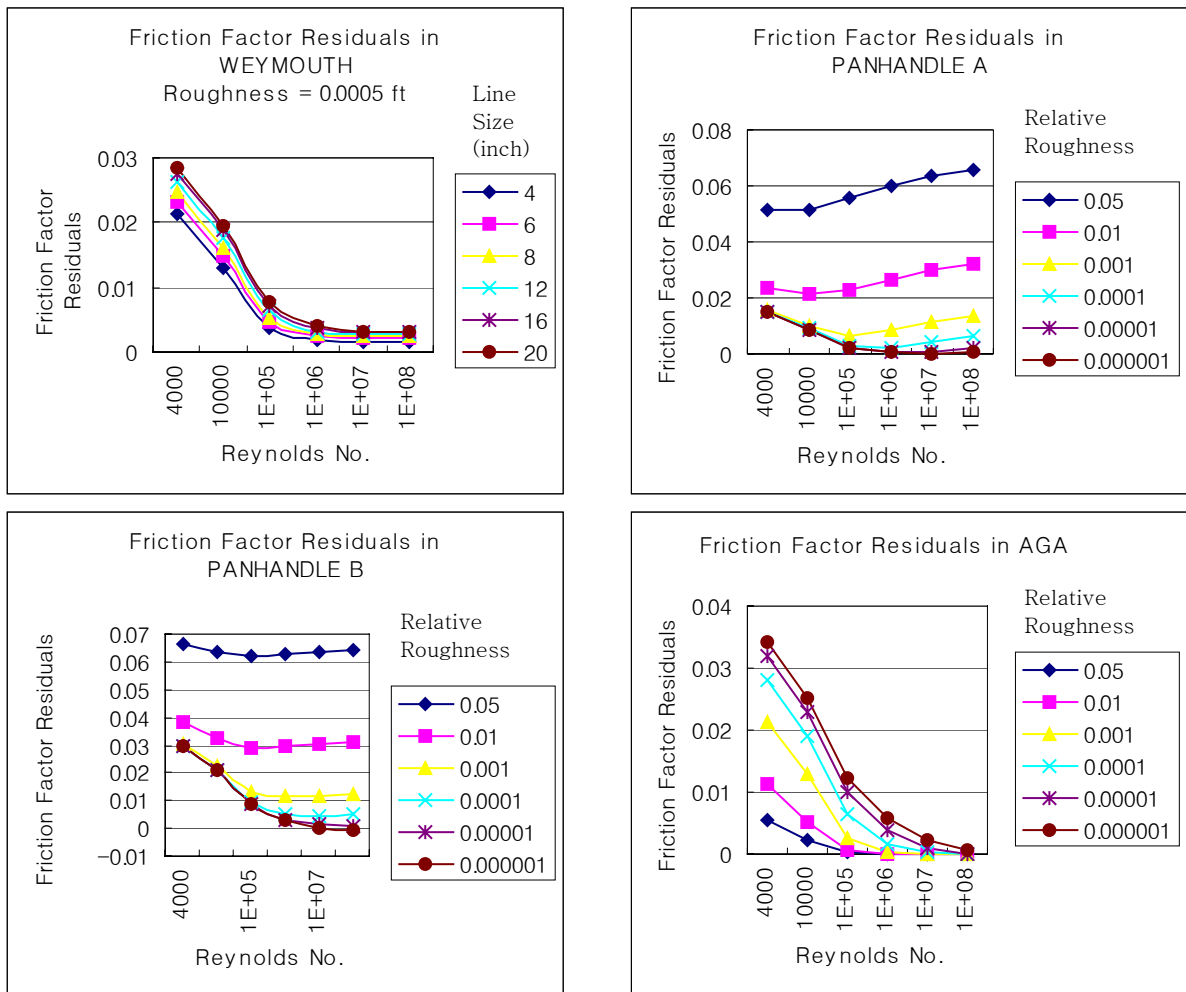


Fig 1. Comparison of different formulae for calculating the pipe friction factor

2.2 Relative Roughness 의 영향

Weymouth, Panhandle A, Panhandle B, AGA 등의 식에서는 relative roughness (ϵ/D)의 영향을 마찰 계수에서 제외하는 대신 효율 계수(E)를 도입하여 이를 해결 하고자 하였으며, Crane[1]에 따르면 Panhandle 식에 적용되는 일반적인 E 값은 0.92이다. 그러나 Liang-biao

Ouyang 등[6]이 Reynolds no.와 relative roughness에 따라 다양한 값이 적용되어야 한다는 사실을 밝힌 바 있으며 이를 표현한 것이 Fig. 2이다.

2.3 점도(Viscosity) 의 영향

현재 엔지니어링 업계에서 많이 사용되는 Panhandle 식은 유체 점도 0.0105cP 기준으로 유도된 식이다. 일반적인 가스의 점도가 상온에서 0.1~0.15cP 인 점을 감안하면 별 무리가 없는 것이나 고온의 유체나 Air, O₂ 등의 유체는 0.2~0.4cP 까지 점도가 올라가므로 이를 고려하지 않을 수 없다. 점도 변화에 따른 Outlet Pressure 의 오차를 나타낸 것이 Fig.3으로, 보는 바와 같이 그 차이는 크지 않으나 유량이 커짐에 따라 혹은 이송 거리가 커짐에 따라 오차 역시 증가하는 것을 볼 수 있다.

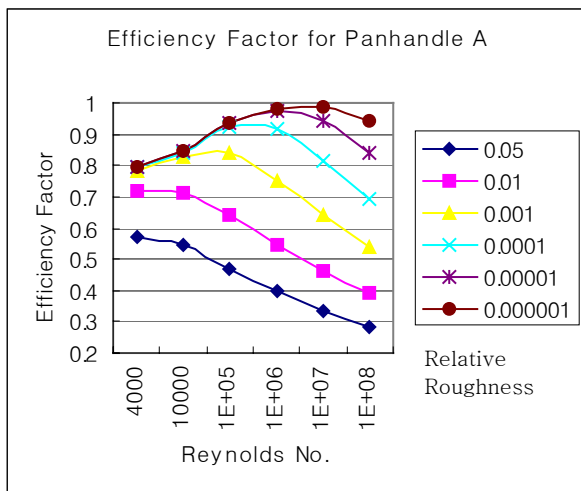


Fig 2. Efficiency factor for panhandle A

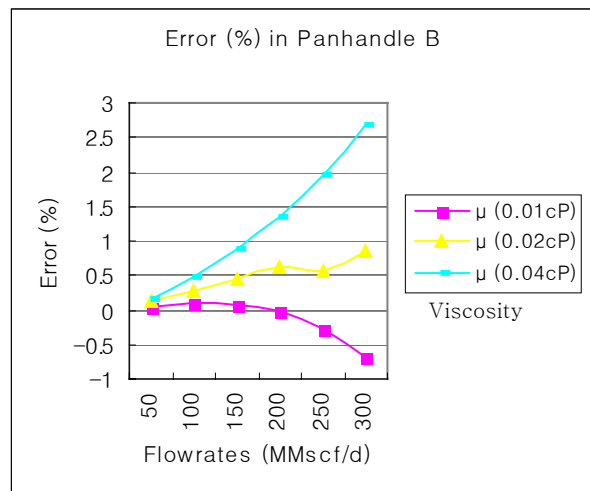


Fig 3. Effects of viscosity

2.4 Kinetic energy(KE) 변화의 영향

일반적 유체 압력 손실계산식인 식 (2)를 유도할 때 적용된 주요 가정 중 하나는 kinetic energy를 무시한 것으로 이에 대한 타당성을 확인해 보기 위해 kinetic energy 항을 포함한 계산 결과와 포함하지 않고 Panhandle B 식을 이용해 계산한 결과를 비교해 Fig. 4에 나타내었다. 그 오차는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 0.1% 내로 상당히 적음을 알 수 있었으며 따라서 kinetic energy 항은 무시할 수 있다고 판단된다.

3. 실제 사례 연구

당사에서 장거리 이송 배관에 대한 설계 업무를 수행하던 중, 한 사업주가 Fig.5와 같은 조건 하에서 나 또는 다 지점의 압력을 1095psia에 맞출 수 있는지 확인 해 달라는 요청을 받은 바 있어, Oliemans식 및 Panhandle B식을 사용하여 각 지점의 압력을 계산하였으며 각 1049psia 및 1092psia를 얻을 수 있었다. 즉, Oliemans 식을 사용한 계산 결과는 사업주 요청을 만족 시킬 수 없었으며 Panhandle B 식을 이용한 계산 결과는 사업

주 요청을 어느 정도 맞출 수 있다는 것이었다. Oliemans 식은 사업주가 제시한 조업 조건에서 상용 모사기가 추천하는 식[8]이었으므로 먼저 Panhandle B 식의 적용이 과연 타당한지에 중점을 두고 살펴 보았다.

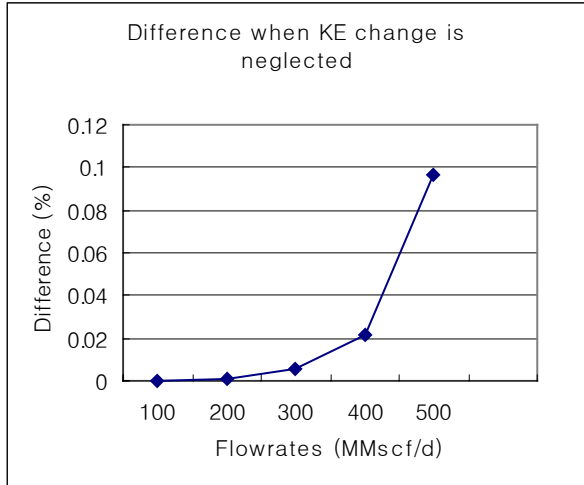


Fig 4. Effects of kinetic energy

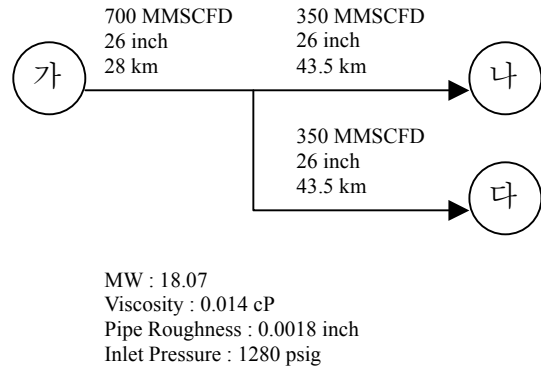


Fig 5. Schematic drawing for actual example

Reynolds no. 및 배관 내경은 각 2.4×10^7 및 25.358 inch로 2.1에서 분석한 바와 12 inch 이상의 구경에 fully turbulent 영역 이므로 사용 가능할 것으로 판단되었으며, 유체의 점도도 0.014cP 이므로 2.3에서 살펴본 바와 같이 별 영향이 없을 것으로 생각되었다. 마지막으로 Panhandle B 식 계산에 적용된 0.92의 E 값을 검토한 결과, 주어진 조건에서의 E 값은 0.92가 아닌 0.85가 타당하다는 것을 알았다. 만일 0.92의 E 값을 roughness로 환산할 경우에는 0.0006 inch에 해당하며 이는 배관 내부에 코팅 처리를 한 경우의 roughness 값이다. E 값을 0.85를 적용하면 나 또는 다 지점에서의 압력이 1051psia가 계산되었으며 이는 Olimans 가 제안한 식을 이용한 계산 결과와 매우 유사한 결과 였다. 즉, Reynolds no. 와 roughness에 따라 E 값이 크게 달라진다는 것을 모르고 Crane등이 추천한 0.92를 그대로 적용할 경우 큰 오류가 발생할 수도 있다는 점을 염두에 두어야 한다.

4. 결론

가스 이송 배관의 압력 손실 계산을 위해 현업에서 주로 이용되는 고전적 식인 Weymouth, Panhandle A, Panhandle B, AGA 식 등을 분석하였다. 그 결과, Reynolds no. 및 배관 구경에 따라 각기 적용 가능 영역이 다르며 특히, roughness를 보정해 주는 항인 efficiency factor의 경우에는 일반적으로 적용해 오던 0.92 값이 실질적으로는 Reynolds no.와 roughness에 따라 상당히 다른 경우가 있다는 것을 알 수 있었다. 이 외에 점도에 따른 영향은 그리 크지 않지만 0.02cP 이상의 점성을 갖는 유체를 다룰 경우에는 어느 정도의 주의를 기울여야 하며, kinetic energy 변화의 영향은 무시할 수 있을 만큼 작다는

사실도 밝혔다. 현업에서 실제 계산을 할 때에도 고전적 식을 이용할 때에는 이러한 제약점들을 정확히 파악하고 적용해야 할 것으로 판단된다.

5. 사용 기호

D	: internal diameter of pipe, inch
E	: pipeline efficiency factor (fraction)
F	: fanning friction factor
G	: acceleration due to gravity, 32.2 ft/sec ²
g _c	: gravitational constant, 32.2 ft lbf/lbf sec ²
L _m	: length of line, mile
MW	: molecular weight
P	: pressure, psia
P _b	: base absolute pressure, 14.73 psia
Q	: Flow rate of gas, scf/day
Re	: Reynolds number
S	: specific gravity of flowing gas (air = 1.0)
T	: absolute temperature of flowing gas, °R
T _b	: base absolute temperature, 520 °R
Z	: compressibility factor

6. 참고 문헌

1. Crane : "Flow of fluids through valves, fittings and pipe", Crane co., Chicago, (1988)
2. GPSA : "Engineering Data Book", (1994)
3. Colebrook, C.F. and White, C.M. : *J. Inst. Civil. Eng.*, 10(1), 99 (1937)
4. Murin, G.A. : *Izv. Vses. Teplotekh. Inst.*, **10**, 21, (1948)
5. Round, G. F., *Can. J. Chem. Eng.*, **Feb.**, 157, (1980)
6. Liang-biao Ouyang and Khalid Aziz : *J. Petroleum Sci. & Eng.*, **14**, 137, (1996)
7. Tian, S. and Adewumi, M.A. : "Development of analytical design equation for gas pipelines", 67th Annu. Tech. Conf. Exhibition, *Soc. Pet. Eng. AIME.*, Washinton, D.C., (1992)
8. Aspen Technology, Inc. : "Pipesys User Guide", (2002)