

# Joule-Thomson 효과를 고려한 천연가스 배관내의 온도 변화

김 윤 제  
성균관대학교 기계공학부

## Temperature Variations in the Natural Gas Pipeline with the Joule-Thomson Effect

Youn J. Kim  
Sung Kyun Kwan University

### Abstract

A numerical method for determining the temperature variation in a natural gas transmission line is presented. By considering an element of the gas pipeline and assuming radially lumped heat transfer at steady-state conditions, the energy equation is developed. The integration of the developed nonlinear differential equation is done numerically using the fourth order Runge-Kutta scheme. The results of the present study have been compared with the results of Coulter equations, and show a fairly good agreement.

**Keywords:** Joule-Thomson Coefficient, van der Waals Gas, Redlich-Kwong Gas

### 1. 서 론

도시가스는 일반적으로 액화천연가스(Liquefied Natural Gas: LNG)와 액화석유가스(LPG)등 두가지로 나눌 수 있는데, LNG가 LPG 보다 훨씬 공해가 적고 안전하기 때문에 선호도가 높다고 할 수 있다. 이러한 청정에너지를 부존자원이 부족한 우리나라는 인도네시아, 말레이시아에서 주로 수입하고 있는 실정이다.

압력강하에 따른 가스배관내의 온도 변화는 가스공급기지 및 지구 정압기 등의 설계시 매우 중요한 변수이다. 정압기는 전기의 변압기와 같은 역할을 하는 것으로, 고압으로 들어온 가스를 각 가정에 공급하기 위해 단계별로 가스압을 낮추는 안전장치이기 때문에 그 기능이 매우 중요하다. 예를 들어, 서울 강남지역

의 도시 가스 공급은 평택 LNG기지에서 70여km의 가스 배관을 통하여 대한도 시가스의 주정압기를 거친 뒤, 각 지구 정압기, 지역 정압기를 다시 거치면서 가스압을 낮춰 가정으로 보내는 단계로 이루어져 있다[1].

가스배관내의 용기된 서리층이나 불안정 상태의 얼음이 녹는 문제점을 피하기 위해서는 반드시 배관내의 온도를 적절히 조절해야만 한다. 또한, 가스량의 증가는 가스온도를 상승시킬 수 있으며, 입력에너지가 Joule-Thomson냉각[2] 및 주변온도와의 열손실과 열평형을 이루지 못하게 될 때 많은 양의 압축동력을 필요로 하게 된다. 가스냉각도(degree of cooling) 및 각 정압기지에서 필요한 압축동력은 각 기지에 유입되는 가스온도에 달려있기 때문에, 가스배관내의 가스온도를 정확히 예측·계산할 수 있어야 한다[3,4].

Schorre[5]는 가스배관내의 온도를 예측하기 위하여 실질적인 가스온도 대신 전도열전달에 의한 가스온도를 사용하였으며 선형적으로 증가하는 Joule-Thomson영향을 고려하였다. Coulter & Bardon[6]은 선형적으로 증가하는 Joule-Thomson 영향 및 실제 가스온도를 고려한 수식을 유도하였다. 또한, Coulter[7]는 상태방정식을 이용하여 배관내의 가스가 갖는 속도 변화를 구하여 온도변화를 예측할 수 있는 수식을 유도하였지만 Joule-Thomson영향은 변하지 않는다는 결과를 발표하였다.

따라서, 본 연구에서는 천연가스 배관내의 온도변화를 예측하기 위하여 Joule-Thomson 냉각 효과의 영향을 고려한 프로그램을 개발하고자 한다.

## 2. 열역학적 배경

가스배관의 미소길이를 고려하여 반경방향으로는 총합열전달을 갖는다고 가정하면, 정상상태의 에너지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(me) dx + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + q''' P dx = 0 \quad (1)$$

위 식에서  $m$ 은 질량유량을,  $q'''$ 는 단위 면적당 가스온도와 배관 주위온도 사이에서 일어나는 열전달율을 나타내며 다음과 같이 정의한다.

$$q''' = U(T - T_s) \quad (2)$$

위치에너지와 운동에너지의 변화를 무시하고 가스 밀도와 가스배관의 단면적이 일정하다고 가정하면, 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \rho V \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{q''' P}{A} = 0 \quad (3)$$

Joule-Thomson 냉각 효과를 고려하기 위하여 위 식을 다시 정리하면 다음과 같

다.

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \rho C_p V \left[ \frac{dT}{dx} - \mu_j \frac{dp}{dx} \right] - \frac{4q'''}{D} = 0 \quad (4)$$

여기서  $\mu_j$  는 Joule-Thomson 계수로서 아래와 같이 정의된다.

$$\mu_j = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{1}{C_p} \left\{ T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right\} \quad (5)$$

한편, 식(4)의 첫번째 항은 기체의 전도열전달을 나타내는데, 가스의 열전달에 관한 실험 결과에 의하면 관내를 흐르는 기체의 전도열전달은 대류열전달에 비하여 매우 작기 때문에 보통 무시하게 된다[8].

일반적인 상태방정식으로 널리 알려진 식은 다음과 같은 van der Waals 상태식이다.

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \quad (6)$$

위 식에서  $a$  는 분자간의 인력을 고려한 상수이며,  $b$  는 분자가 차지한 체적에 대한 수정계수를 나타내는데, 가스의 일반적인 거동으로 부터 구하게 된다.

$$a = \frac{27}{64} \frac{R^2 T_c^2}{p_c}$$

$$b = \frac{1}{8} \frac{RT_c}{p_c}$$

여기서 하첨자  $( )_c$  는 임계점(critical point)에서의 물성치를 나타낸다. 따라서, van der Waals 상태식을 만족하는 기체의 Joule-Thomson 계수는 다음식으로 정의할 수 있다.

$$\mu_j = \frac{1}{C_p} \left\{ \frac{2a}{RT} - b \right\} \quad (7)$$

또한, van der Waals 상태식보다 더 정확성이 있고 간단하며, 천연가스와 같은 혼합물 및 상평형의 상관관계에 자주 사용되는 상태방정식으로는 Redlich-Kwong이 제안한 다음식을 들 수 있다.

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)T^{1/2}} \quad (8)$$

여기서 상수값  $a, b$  는 아래식으로 나타낼 수 있는데, van der Waals 상태식의 경우에서의와 동일한 방법으로 구한다.

$$a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^{5/2}}{p_c}$$

$$b=0.08664\frac{RT_c}{p_c}$$

따라서, Redlich-Kwong 상태식의 Joule-Thomson 계수는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_j = \frac{1}{C_p} \left\{ \frac{2.5a}{RT^{3/2}} - b \right\} \quad (9)$$

### 3. 해석 및 결과 고찰

해석에 사용된 하절기, 동절기의 가스 물성치 및 유동 조건은 Table 1에 기술하였다. 관내를 흐르는 기체는 84%의 메탄( $CH_4$ )과 16%의 에탄( $C_2H_6$ )으로 구성된 천연가스를 고려하였다. 에너지 방정식은 4차 Runge-Kutta기법을 이용하여 해를 구하였으며, 이때 초기조건으로써 온도는 임의의 값을 사용하였다.

Table 1 Flow conditions and thermal properties of natural gas

	SUMMER	WINTER
$Q [m^3/s]$	213.6	184.5
$p_1 [MPa]$	5.48	5.47
$p_2 [MPa]$	3.08	3.12
$T_s [^\circ C]$	26.67	16.67
$x [km]$	130	
$D [m]$	0.6096	
$U [J/(m^2 s K)]$	2.8391	
$C_p [J/(kg K)]$	2089	
$R [J/(kg K)]$	455.8	

Fig. 1과 2는 각각 동절기와 하절기의 가스배관내의 온도 분포를 각기 다른 상태방정식을 이용하여 도시하였는데, 세가지의 상태방정식에 따른 온도변화는 유사함을 알 수 있다. 또한, Table 1에 기술한 바와 같이 120 km 정도의 구간에 천연가스를 수송한다고 할 때 2.4 MPa의 감압시 약 35°C 정도의 온도강하를 가져옴을 알 수 있다. 압력강하값을 구하는 데에는 일반적으로 Weymouth의 압력강하식과 같은 다양한 식이 있지만, 본 고에서는 입·출구점의 압력차를 배관의 전체길이로 나눈 평균 압력강하값을 이용하였다.

$$dp = f \frac{dx}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (10)$$

여기서  $f$ 는 마찰계수를 나타낸다.

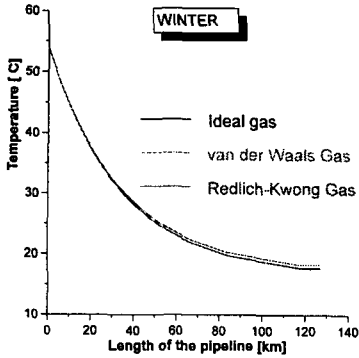


Fig. 1 Comparison of gas pipeline temperatures with the different state equations for winter conditions.

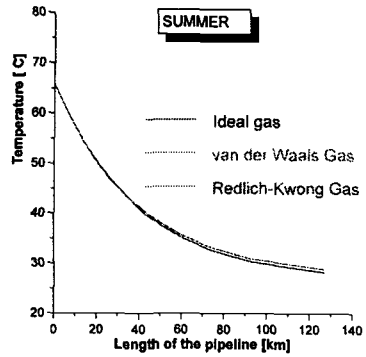


Fig. 2 Comparison of gas pipeline temperatures with the different state equations for summer conditions.

Fig. 3과 4는 하절기 가스배관내의 van der Waals 기체와 Redlich-Kwong 기체의 Joule-Thomson 영향을 각각 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 선행연구자들의 결과와는 달리 Joule-Thomson계수는 선형적이 아닌 점근적인 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다.

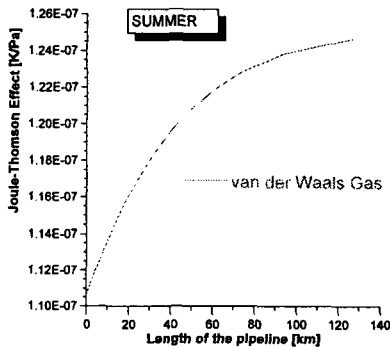


Fig. 3 Joule-Thomson effect of the van der Waals gas along the gas pipeline for summer conditions.

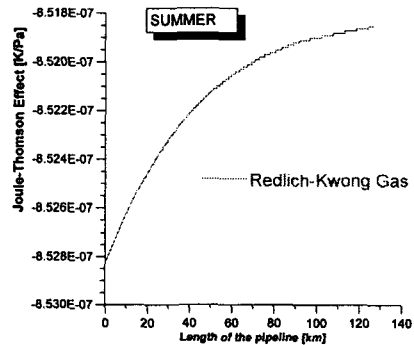


Fig. 4 Joule-Thomson effect of the Redlich-Kwong gas along the gas pipeline for summer conditions.

#### 4. 결 론

청정에너지로서의 천연가스 사용량이 급증함에 따라 배관망의 안전성 확보가 날로 증대되고 있다. 특히, 안전한 정압기지 구축을 위해서는 배관내의 가스 물성치 변화를 정확히 예측해야만 한다. 본 고에서는 압력강하에 따른 천연가스 배관망의 건전성 확보를 위한 배관내 가스온도 변화를 수치적으로 해석하였다. 하절기 및 동절기의 가스 공급에 필요한 적정 압력강하와 이에 수반하는 온도변화, 즉 Joule-Thomson계수를 고찰하였으며 기존의 해석결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었지만, Joule-Thomson계수는 선형적으로 변화하는 것이 아니라 점근적으로 변화함을 알 수 있었다.

향후 연구에서는 관내의 밀도 및 속도변화를 고려한 보다 세밀한 해석기법의 개발과 압력강하에 따른 마찰계수의 선정, 그리고 실증 실험을 통한 개발 모델의 타당성을 검증해야만 할 것이다.

#### 참고문헌

1. 한국가스공사: "LNG 편람"(1985)
2. Van Wylen, G.J. and Sonntag, R.E.: "*Fundamentals of Classical Thermodynamics*", 3rd ed., John Wiley & Sons, New York(1985).
3. Adorjan, A.S.: "*Heat Transfer in LNG Engineering*", Hemisphere, New York(1990).
4. Katz, D.L.: "*Handbook of Natural Gas Engineering*", McGraw-Hill, New York(1959).
5. Schorre, C.E. : The Oil and Gas Journal, 53, 64(1954)
6. Coulter, D.M. and Bardon, M.F. : The Oil and Gas Journal, 77, 107(1979)
7. Coulter, D.M. : Pipeline Industry, 50, 71(1979)
8. Arpaci, V.S.: "*Conduction Heat Transfer*", Addison-Wesley, Reading(1966).