

소닉노즐을 이용한 천연가스 유량측정에서 임계유동인자 계산

하영철[†] · 허재영 · 장승룡

한국가스공사 연구개발원 유체유동연구팀
(1998년 12월 28일 접수, 1999년 4월 7일 채택)

Evaluation of Critical Flow Factor in Natural Gas Flow Measurement Using Sonic Nozzle

Youngcheol Ha[†] and Jaeyoung Her and Seungyong Chang

Fluid Flow Research Team, R&D Training Center, KOGAS, Ansan, Korea
(Received 28 December 1998; accepted 7 April 1999)

요 약

소닉노즐은 가스유량계 교정에 널리 사용되는 기준기이다. 소닉노즐로 흐르는 유량을 계산하기 위해서는 임계유동인자라는 노즐 목 조건의 열역학적 물성값이 필요하며 ISO-9300은 이에 대한 계산방법을 제공한다. 그런데 이 방법으로 계산한 임계유동인자는 특정 조건에서 0.5% 이상의 오차가 발생할 수 있고 일반적인 천연가스 거래조건에서도 0.1% 이상의 오차가 있음이 보고되어 있어서, 높은 정확도가 요구되는 천연가스 유량측정에 적용하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 ISO의 방법보다 정확하게 임계유동인자를 계산하고자 하였다. 이를 위해 현재까지 가장 정확하다고 알려진 천연가스 상태방정식 AGA-8('94)을 이용하였고, 이상기체의 물성계산 모델도 불확도 $\pm 0.05\%$ 이내의 계산식을 사용하였다. 그 결과 본 연구에서 계산한 임계유동인자는 천연가스 거래조건에서 $\pm 0.1\%$ 이내의 정확도를 보여준다.

Abstract – Sonic nozzle is widely used for reference of calibrating flowmeters in gas flow measurement and its use requires the critical flow factor on the thermodynamic properties of the gas at the nozzle throat. ISO-9300 provides the calculating method of the factor. But since the critical flow factors from this method show an errors over 0.5% in specific conditions and over 0.1% in general NG custody transfer condition, this method cannot be applied for gas flow measurement with sonic nozzle. Therefore in this study, the other method is used to calculate the critical flow factor for higher accuracy than the ISO method. The equation of state from AGA-8('94) and high accuracy(within ± 0.05) model of ideal gas properties are used in calculating the factor. The results of this study show that the accuracy of critical flow factors are within $\pm 0.1\%$ in the NG custody transfer condition.

Key words: Critical Flow Factor, Sonic Nozzle, Natural Gas

1. 서 론

가스유량측정에서 표준유동률 결정방법이 중량식인 경우 직접 교정 가능한 기준유량계(transfer meter)는 소닉노즐뿐이다. 우리 나라의 경우 표준기관에서 중량식 방법을 쓰고 있기 때문에 이로부터 표준유동률을 공급받는 교정검사기관의 기준기는 거의 대부분이 소닉노즐로 되어 있다. 소닉노즐로 흐르는 유량을 계산할 때 한 가지 어려움은 임계유동인자의 계산에 있다. 매체가 공기일 경우 ISO-9300[1]의 방법을 따르면 문제가 없지만 천연가스일 때는 정확한 임계유동인자의 계산에 어려움이 따른다.

지금까지 임계유동인자 계산에는 Venix-Kobayashi(V-K) 압축계수 계산식을 기초로 한 Johnson[2]식이 사용되어 왔으며, 표준규격서 ISO-9300에도 이 식을 권고하고 있다. 그러나 이 식은 특정조건에서 0.5

% 이상의 오차가 생길 수 있음이 밝혀진 바 있고 일반적인 유동조건-거래용 천연가스 배관의 일반적인 온도, 압력, 가스조성 등-에서도 0.1% 이상의 오차를 발생할 수 있다고 보고되어 있다. 소닉노즐이 다른 유량계를 교정하는 기준기로 사용한다는 점과 임계유동인자 외에 다른 인자들 또한 어느 정도 오차를 갖고 있다는 것을 감안할 때 0.1% 이상의 임계유동인자 오차는 간과할 수 없는 크기이다. 따라서 임계유동인자 계산에 ISO식을 사용해서는 안 되고 정확도가 더 높은 다른 방법을 사용해야 함은 분명한 사실이 된다.

임계유동인자의 정확도는 천연가스의 압축계수와 밀접한 관계가 있으며, 압축계수의 정확도가 직접적으로 임계유동인자의 정확도에 영향을 미친다. 따라서 지금까지 임계유동인자를 정확히 계산할 수 없었던 주요 원인 중의 하나는 정확한 압축계수를 계산하는 상태방정식이 도출되지 않은데 있다.

정확한 가스압축계수를 예측하기 위해 GRI(Gas Research Institute, 미국)는 AGA(American Gas Association)와 공동으로 새로운 상태 방

[†]E-mail : fractals@kogas.re.kr

정식을 개발했는데 이 상태방정식의 정확도는 대부분의 유동 조건에서 $\pm 0.1\%$ 이내로 밝혀졌다. 이 방정식은 미국 규격서 AGA-8로 명명되어 '85년도에 초판이 발간된 이후 '92년도에 개정되고 '94년도에 일부 수정되었다.

ISO에서는 이 새로운 상태방정식과 기존보다 정확한 이상기체 물성 모델을 기초로 임계유동인자 계산식의 정확도를 개선하려는 노력을 하고 있으며, 이러한 노력의 일환으로 세계 각국에서 상이한 방법으로 도출된 임계유동인자를 비교 분석하는 국제비교 연구가 수행되고 있다.

당공사도 이 비교 연구에 참여하고 있고 또한 '99년도에 천연가스 대유량이 교정시스템(1차 기준기는 소닉노즐)이 구축 완료 예정이어서 이에 필요한 정확한 임계유동인자를 계산하게 되었다.

이를 위해 현재까지 가장 정확하다고 알려진 천연가스 상태방정식 AGA-8('94)[3]을 이용하였고, 이상기체의 물성 계산 모델도 불확도 $\pm 0.05\%$ 이내의 계산식을 사용하였다. 또한 ISO의 방법에서 7가지 가스성분만이 고려된 것과 달리 천연가스 내 성분이 모두 고려될 수 있도록 열역학 방정식을 완전히 풀었다.

2. 임계유동인자의 정의

소닉노즐로 흐르는 가스의 질량유량은 다음과 같은 일반적인 유량식으로 계산될 수 있다.

$$Q_m = C_d \rho_* V_* A_* \quad (1)$$

여기서 Q_m 은 가스의 질량유량, ρ_* 는 노즐 목에서 가스 밀도, V_* 는 노즐 목에서 가스속도, A_* 는 노즐 목의 단면적, C_d 는 노즐의 유출계수를 나타낸다.

식 (1)로 유량을 계산하기 위해서는 노즐 목에서 가스의 온도, 압력을 정확히 측정해야 하는데 노즐 목의 유동이 외부 간섭에 대단히 민감하기 때문에 실제로 이를 측정하기란 어렵다. 그러나 노즐 입구에서 목까지 거리가 대단히 짧고 유속이 빠르기 때문에 이 사이의 유동을 등엔트로피로 가정할 수 있으며 이로부터 식 (1)을 (2)로 변형하여 노즐 입구온도와 압력을 대신 측정하게 된다.

$$Q_m = C_d A_* C_* \frac{P_o}{\sqrt{RT_o}} \quad (2)$$

여기서, T_o , P_o 는 정체온도와 정체압력을 각각 나타내는데 이 값들은 노즐 입구에서 측정된 온도와 정압으로부터 계산될 수 있다.

식(1)과 (2)로부터 임계유동인자 C_* 는 다음과 같이 정의되며, 소닉노즐 입구와 목 사이에 형성된 1차원, 등엔트로피 흐름의 열역학적 물성을 나타내게 된다.

$$C_* = \rho_* V_* \frac{\sqrt{RT_o}}{P_o} \quad (3)$$

3. 임계유동인자 계산

3-1. 압축계수

현재까지 알려진 가장 정확한 천연가스 압축계수식은 AGA-8('94)이다. 이를 이용하여 압축계수를 계산할 때 필요한 것은 가스의 조성, 온도 및 압력이며 천연가스뿐만 아니라 순수 메탄, 에탄, 이산화탄소, 질소, 수소의 압축계수 계산에도 적용할 수 있다.

압축계수를 구하는 상태방정식은 AGA-8('94)를 참고하기 바람에 최종 결과식은 식 (4)와 같다.

$$Z = 1 + \bar{P}B - K^2 \bar{P} \sum_{n=13}^{18} C_n^* T^{-U_n}$$

$$+ \sum_{n=13}^{58} C_n^* T^{-U_n} (b_n - c_n k_n (K^3 \bar{P})^{k_n}) D^{b_n} \exp(-c_n (K^3 \bar{P})^{k_n}) \quad (4)$$

3-2. 계산방법

식 (3)에서 보는 바와 같이 임계유동인자를 계산하기 위해서는 정체압력 P_o , 정체온도 T_o , 노즐 목의 기체밀도 ρ_* 와 음속 V_* 가 필요하다. P_o , T_o 는 노즐 입구의 온도와 압력을 측정하여 쉽게 계산할 수 있으나 노즐 목의 온도, 압력은 실측하기 대단히 어려워 이로부터 계산되는 ρ_* 와 V_* 는 1차원 등엔트로피 흐름의 열역학적 관계식을 이용하여 구해야 한다.

임계유동인자를 계산하는 수치 해석법의 기본 개념은 노즐 입구의 정체엔탈피와 노즐 목의 엔탈피 차이로 구한 기체속도와 노즐 목의 음속이 일치하는 온도를 찾아 임계유동인자를 구하는 것이다. 즉 추측한 노즐 목의 온도가 실제 노즐 목의 온도와 차이가 있으면 엔탈피 차이로 구한 속도가 음속과 다르게 되며, 이 두 속도값이 일치할 때의 온도가 노즐 목에서의 값이 된다.

임계유동인자를 계산하기 위해서는 식 (3), (4)외에 다음과 같은 열역학적 관계식이 더 필요하다.

$$H_o - H_* = \frac{v_*^2}{2} \quad (5)$$

$$S_o - S_* = 0 \quad (6)$$

$$a = \left[\frac{\kappa RT}{M} \left(Z + \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$H = H^o + RT \left[(Z-1) - \int_0^1 T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \right] \quad (8)$$

$$S = S^o - R \ln(\rho RT) - R \int_0^1 \left\{ (Z-1) + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right\} \frac{\partial \rho}{\rho} \quad (9)$$

$$C_v = (C_p^o - R) - R \int_0^1 \left[2T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho + T^2 \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_\rho \right] \frac{\partial \rho}{\rho} \quad (10)$$

$$C_p = C_v + R \frac{\left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_\rho \right]^2}{\left[Z + \rho \left(\frac{\partial Z}{\partial \rho} \right)_T \right]} \quad (11)$$

임계유동인자를 구하는 절차는 다음과 같으며 이를 설명하면 다음과 같다. 여기서 정체압력과 정체온도는 알고 있는 값으로 가정한다.

(1) 노즐 목의 온도 T_* 를 가정하고 식 (6)과 (9)를 이용하여 노즐 목의 밀도 ρ_* 를 구한다.

(2) 단계 (1)의 T_* 와 ρ_* 그리고 식 (8)을 이용하여 기체가 노즐로 흐를 때 생기는 엔탈피 변화량을 구한다.

(3) 단계 (2)에서 구한 엔탈피 변화량을 식 (5)에 대입하여 노즐 목의 기체속도 V_* 를 구한다.

(4) 단계 (1)의 온도와 밀도 그리고 식 (7)을 이용하여 음속 a 를 구한다.

(5) 노즐 목의 속도 V_* 와 음속 a 를 비교한다. 만약 이 두 값이 일치하지 않으면 T_* 를 변화시켜 허용한도(예 <0.0001) 내로 일치할 때까지 위의 단계들을 반복한다.

3-3. 이상기체의 열역학적 관계식

임계유동인자의 계산에 관련된 식 (5)-(11)은 이상기체에 관한 정압비열 C_p^o , 엔탈피 H^o , 엔트로피 S^o 와 관련되어 있다. 따라서 이들 값을 정확히 산출하는 것 또한 임계유동인자 계산에 필수적이다.

이상기체에 관한 일반적인 관계식은 Passut와 Danner[4]가 제안한 식이 있으나 천연가스의 음속을 계산하기에는 정확도가 떨어지는 것

으로 알려져 있다. 보다 정확한 식으로는 Aly와 Lee model[5]을 기초로 개발된 Macfall's model[6]이 있으며, 임계유동인자를 계산하기에 충분한 정확도를 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 이 식을 사용하였으며 다음과 같다.

$$C_p^o = B' + \left[\frac{\frac{D'}{T}}{\sinh\left(\frac{D'}{T}\right)} \right]^2 + E' \left[\frac{\frac{F'}{T}}{\cosh\left(\frac{F'}{T}\right)} \right]^2 + G' \left[\frac{\frac{H'}{T}}{\sinh\left(\frac{H'}{T}\right)} \right]^2 + I' \left[\frac{\frac{J'}{T}}{\cosh\left(\frac{J'}{T}\right)} \right]^2 \quad (12)$$

$$H^o = A' + B'T + C'D' \coth\left(\frac{D'}{T}\right) - E'F' \tanh\left(\frac{F'}{T}\right) + G'H' \coth\left(\frac{H'}{T}\right) - I'J' \tanh\left(\frac{J'}{T}\right) \quad (13)$$

$$S^o = K' + B' \ln(T) + C' \left[\frac{D'}{T} \coth\left(\frac{D'}{T}\right) - \ln \left\{ \sinh\left(\frac{D'}{T}\right) \right\} \right] - E' \left[\frac{F'}{T} \tanh\left(\frac{F'}{T}\right) - \ln \left\{ \cosh\left(\frac{F'}{T}\right) \right\} \right] + G' \left[\frac{H'}{T} \coth\left(\frac{H'}{T}\right) - \ln \left\{ \sinh\left(\frac{H'}{T}\right) \right\} \right] - I' \left[\frac{J'}{T} \tanh\left(\frac{J'}{T}\right) - \ln \left\{ \cosh\left(\frac{J'}{T}\right) \right\} \right] \quad (14)$$

Table 1에는 식 (12)-(14)에 있는 계수를 나타내었다. 여기에 없는 천연가스의 성분에는 Table 2에 있는 Aly-Lee model의 계수를 사용하며, 이때 계수 G', I'는 '영'으로 하여 계산하면 된다.

4. 결과 및 고찰

본 계산 정확도를 확인할 수 있는 자료는 현재로는 대단히 제한적

Table 1. Ideal gas property coefficients for key constituents of NG in Macfall's model

	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	CO ₂	H ₂ S
A'	-29776.4	-37524.1	-56072.1	-3495.34	20.73070	-10085.4
B'	7.954540	7.981390	8.143190	6.955870	6.962370	7.946800
C'	43.94170	24.36680	37.06290	0.272890	2.686450	-0.08380
D'	1037.090	752.3200	735.4020	662.7380	500.3710	433.8010
E'	1.563730	3.539900	9.381590	-0.29132	-2.56429	2.855390
F'	813.2050	272.8460	247.1900	-680.562	-530.443	843.7920
G'	-24.9027	8.447240	13.45560	1.789800	3.919210	6.315950
H'	1019.980	1020.130	1454.780	1740.060	500.1980	1481.430
I'	-10.1601	-13.2732	-11.7342	0.000000	2.132900	-2.88457
J'	1070.140	869.5100	984.5180	100.0000	2197.220	1102.230
K'	-20.0615	-22.4010	-24.0426	4.498230	5.813810	-0.51551

Table 2. Ideal gas property coefficients for heavy constituents of NG in Aly-Lee model

	I-C ₄ H ₁₀	N-C ₄ H ₁₀	I-C ₅ H ₁₂	N-C ₅ H ₁₂	N-C ₆ H ₁₄	N-C ₇ H ₁₆	N-C ₈ H ₁₈	N-C ₉ H ₂₀	H ₂ O
A'	-72387.0	-72674.8	-91505.5	-83845.2	-94982.5	-103353.	-109676.	-122599.	-13773.1
B'	17.8143	18.6383	21.3861	22.5012	26.6225	30.4029	34.0847	38.5014	7.97183
C'	58.2062	57.4178	74.3410	69.5789	80.3819	90.6941	100.253	111.446	6.27078
D'	1787.39	1792.73	1701.58	1719.58	1718.49	1669.32	1611.55	1646.48	2572.63
E'	40.7621	38.6599	47.0587	46.2164	55.6598	63.2028	69.7675	80.5015	2.05010
F'	808.645	814.151	775.899	802.174	802.069	786.001	768.847	781.588	1156.72
G'	-44.1341	-46.1938	-60.2474	-62.2197	-77.5366	-92.0164	-106.149	-122.444	-3.24989

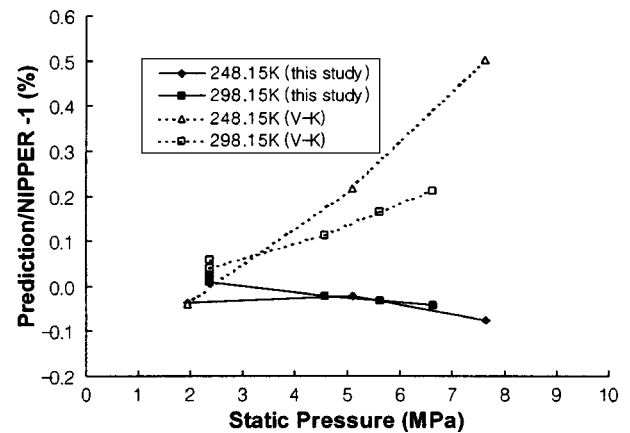


Fig. 1. Comparison of sonic velocity of methane between nipper data and two predictions.

이어서 활용 가능한 음속결과와 순수메탄에 대한 임계유동인자에 대해서만 비교 고찰하였다. 식 (3)에서 보는 바와 같이 음속은 임계유동인자의 정확도에 결정적인 역할을 한다. 따라서 계산된 음속값을 실험값과 비교해 보면 간접적으로 임계유동인자의 정확도를 알 수 있다.

Fig. 1은 NIPPER[7]에서 측정된 메탄의 음속값과 V-K방정식(ISO 임계유동인자에 사용된 압축계수계산식)으로 계산한 음속값을 본 계산결과와 비교한 것이다. 여기서 비교 온도를 248.15 K와 298.15 K로 한 것은 노즐 목의 온도가 대부분 이 값 내에 들어오기 때문이다. 실험값과 각 계산값을 비교해 보면, 저압에서는 V-K 방정식으로 계산한 음속값이 실험값과 비교적 잘 일치하는 것을 관찰할 수 있으나 고압으로 갈수록 편차는 증가하며 약 8 MPa 근방에서는 0.5% 이상임을 관찰할 수 있다. 반면 본 계산 결과는 압력 8 MPa까지 실험값과 0.1% 이내로 잘 일치하고 특히 7 MPa 이하에서는 이 차이가 0.05%로 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 2는 미국표준연구소(NIST)의 메탄의 음속 측정값[8]과 비교한 결과이다. 온도영역 223-423 K, 압력은 25 MPa까지의 음속 측정값과

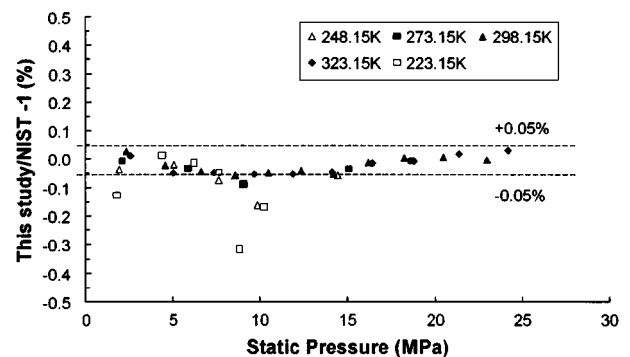


Fig. 2. Comparison of sonic velocity of methane between NIST experimental data and this study.

Table 3. Comparison of sonic velocity of NG between this study and GRI predictions(top: this study, middle: GRI, bottom: deviation)

	Gulf coast ⁺ gas mixture (A)	Amarillo ⁺ gas mixture (B)
@ 15.56 °C	430.49	419.94
0.10156 MPa	430.50	419.95
	-0.002%	-0.002%

⁺See. AGA-9('98) Appendix c-13

Table 4. Comparison of critical flow factor of methane between this study and Stewart predictions(top: this study, middle: Stewart, bottom: deviation)

Kelvin	MPa	0.1	4	10
240		0.67322	0.73120	0.91214
		0.67323	0.73118	0.91211
		-0.001%	0.003%	0.003%
260		0.67230	0.71510	0.81811
		0.67229	0.71515	0.81818
		-0.001%	0.007%	-0.009%
280		0.67120	0.70396	0.77195
		0.67119	0.70403	0.77203
		-0.001%	0.010%	-0.010
300		0.66993	0.69558	0.74406
		0.66992	0.69566	0.74413
		-0.001%	-0.011%	-0.009%
320		0.66850	0.68890	0.72504
		0.66850	0.68898	0.72513
		-0.001%	-0.012%	-0.012%

편차를 비교했는데 250 K 이상에서는 평균적으로 0.05% 이하의 차이를 보이고 있다. 그러나 온도 250 K 이하 또는 고압에서는 0.1% 이상의 편차를 발견할 수 있는데 이는 AGA-8('94)의 불확도가 이 영역에서 0.1%가 넘는 것으로 설명될 수 있다.

Table 3은 AGA-9[9]에 수록된 GRI(Gas Research Institute)의 음속계산값과 비교한 결과이다. 계산에 사용된 천연가스 성분 (A), (B)는 AGA-8 ('94)의 밀도계산식을 만들 때 기준으로 사용된 것이며 본 계산과 GRI 계산에 사용된 밀도계산식은 AGA-8로서 동일하다.

가스성분 (A), (B)에 대해서 본 연구의 계산값과 GRI의 계산값이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 약간의 차이(0.002%)가 나는 것은 정적비열 C_p 계산에 사용된 이상기체 물성값이 서로 다른 데서 비롯된 것으로 생각된다.

Table 4는 Stewart[10]가 메탄에 대해 임계유동인자를 계산한 결과와 비교한 것이다. Stewart의 계산방식은 기본 계산과정-엔탈피와 엔트로피 차이를 이용하여 음속을 구하는 방법-에서 본 연구와 차이가 없지만 세부적인 계산 방식과 순수 메탄에 대한 상태방정식을 사용한 점에서 본 연구와 다르다. 그렇지만 계산결과의 차이는 거의 없는 것을 알 수 있다. 0.1 MPa에서의 차이는 거의 무시할 수 있을 정도이고, 고압에서는 약간의 차이가 나는데 가장 큰 차이도 0.012%를 넘지 않는다. 이는 본 연구와 Stewart의 계산에 사용된 상태방정식 및 이상기체 모델의 불확도가 거의 유사한 데서 비롯된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 ISO 9300의 임계유동인자를 대신할 수 있는 보다 정확한 소닉노즐의 임계유동인자를 계산하였다. 이를 위해 현재까지 가장 정확하다고 알려진 천연가스 밀도계산코드 AGA-8('94)을 이용하였고, 이상기체의 물성계산 모델도 불확도 $\pm 0.05\%$ 이내의 계산식

을 사용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 메탄의 음속측정 자료 및 천연가스 음속계산결과와 비교한 결과 천연가스 거래조건에서는 각각의 편차가 $\pm 0.05\%$, $\pm 0.002\%$ 이내였다. 이로부터 본 계산의 음속 예측 정확도는 $\pm 0.1\%$ (=압축계산코드 AGA-8의 불확도) 이내가 될 것이라고 잠정적으로 결론을 내릴 수 있고 음속과 밀접하게 관련된 임계음속의 정확도도 이와 유사하다고 판단할 수 있다.

둘째, 순수메탄의 상태방정식을 이용하여 계산된 Stewart의 임계유동인자값과 비교한 결과 편차는 최대 0.012%이었으며 이와 같은 결과로 볼 때 본 연구에서 제시한 방법은 양호한 것으로 판단된다.

사용기호

- A_* : cross-sectional area of the nozzle throat [m^2]
- A' : coefficient of Macfall model [cal/mole]
- a : speed of sound [m/s]
- B : virial coefficient [m^3 /mole]
- B' : coefficient of Macfall model [cal/mole]
- b_n : constant defined by Eq. (4)
- C_d : discharge coefficient of sonic nozzle
- C_p : constant pressure heat capacity [J/mole-K]
- C_v : constant volume heat capacity [J/mole-K]
- C' : coefficient of Macfall model [cal/mole-K]
- C_* : critical flow factor
- C_n^* : coefficients which are functions of composition
- c_n : constant defined by Eq. (4)
- D' : coefficient of Macfall model [K]
- E' : coefficient of Macfall model [cal/mole-K]
- F' : coefficient of Macfall model [K]
- G' : coefficient of Macfall model [cal/mole-K]
- H : enthalpy [J/mole]
- H' : coefficient of Macfall model [K]
- I' : coefficient of Macfall model [cal/mole-K]
- J' : coefficient of Macfall model [cal]
- K : size parameter
- K' : coefficient of Macfall model [cal/mole-K]
- k_n : constant defined by Eq. (4)
- M : molar mass [kg/mole]
- P : pressure [Pa]
- S : entropy [J/mole-K]
- T : temperature [K]
- U_n : constant defined by Eq. (4)
- R : universal gas constant [J/kmole-K]
- V : velocity [m/s]
- Z : compressibility factor

그리스 문자

- κ : specific heat ratio
- ρ : density [kg/m^3]
- $\bar{\rho}$: molar density [mole/ m^3]

상첨자

- o : ideal gas

하첨자

- o : condition at the plenum
 * : condition at the nozzle throat

참고문헌

1. ISO 9300, International Organization for Standardization, Geneva(1990).
2. Johnson, R. C.: NASA Report SP-3074(1972).
3. AGA Report No. 8, American Gas Association(1994).
4. Passut, C. A. and Danner, R. P.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **11**, 543(1972).
5. Aly, F. A. and Lee, L. L.: *Fluid Phase Equilibria*, **6**, 169(1981).
6. McFall, R. L.: Master Thesis, University of Oklahoma, Oklahoma, USA(1984).
7. Sivaraman, A. and Bammon, B. E.: NIPPER Report 142(1982).
8. Gammon, B. E. and Sivaraman, A.: Gas Research Institute, Final Report, GRI-86/00043(1986).
9. AGA Report No. 9, American Gas Association(1998).
10. Stewart, D. G.: "Improved Critical Flow Factors and Representative Equations for Four Calibration Gases," Proceedings of FLOMECO '98(1998).