

소닉노즐을 이용한 천연가스 유량측정에서 임계유동인자 계산 및 국제비교 결과

하 영 철* · 허 재 영**
(1999년 2월 1일 접수)

Evaluation of Critical Flow Factor in Natural Gas Flow Measurement Using Sonic Nozzle and International Comparison Results

Youngcheol Ha and Jaeyoung Her

Key Words: Critical Flow Factor(임계유동인자), Sonic Nozzle(소닉노즐), Natural Gas(천연가스), Speed of Sound (음속)

Abstract

The sonic nozzle is widely used as reference device for calibrating flowmeters in gas flow measurement and its use requires the Critical Flow Factor(CFF) based on the thermodynamic properties of the gas at the nozzle throat. ISO-9300 provides the calculating method of the factor. But since the CFF from this method show an error over $\pm 0.5\%$ in specific conditions and of $\pm 0.1 \sim \pm 0.2\%$ in common Natural Gas(NG) custody transfer condition, this method cannot be applied for gas flow measurement with sonic nozzle. Each research bodies or organizations of the world have joined in order to calculate the CFF more accurately. They have performed these works using their own method and compared the results with each other under the management of ISO. KOGAS have joined those works, because the high-pressure natural gas flow calibration facility of KOGAS will be constructed in late 1999, and then had necessities to calculate a CFF accurately. The calculation method of KOGAS was using the equation of state from AGA-8(94), high accuracy model of ideal gas properties and the solutions of thermodynamic equations. The evaluation results have had a very good consistency within $\pm 0.05\%$ in most NG custody transfer conditions compared to the speed of sound for methane and also shown that the CFF was within $\pm 0.1\%$ compared to the results of other works of the world.

기호설명

- A : 소닉노즐 목의 단면적
- a : 노즐 목 조건에서 음속
- b_n : 상태방정식 AGA-8(94)의 매개변수
- B : 비리얼 계수
- c_n : 상태방정식 AGA-8(94)의 매개변수
- C : 임계유동인자

- C_n^* : 상태방정식 AGA-8(94)의 가스 조성계수
- C_d : 소닉노즐의 유출계수
- C_p : 정압비열
- C_v : 정적비열
- D : 환산밀도
- H : 엔탈피
- k_n : 상태방정식 AGA-8(94)의 매개변수
- K : 크기 매개변수
- m : NG 성분의 개수
- M : NG의 물질량
- P : 압력

* 회원, 한국가스공사 연구개발원 공급연구실

** 한국가스공사 연구개발원 공급연구실

- S : 엔트로피
 T : 온도
 R : 일반가스상수
 u_n : 상태방정식 AGA-8(94)의 매개변수
 V : 속도
 x : NG 성분의 몰분율
 Z : 압축계수

그리스 문자

- κ : 비열비
 ρ : 밀도
 Σ : 합계

위첨자

- o : 이상기체

아래첨자

- o : 정제 조건
 * : 소너노즐 목의 조건
 i : NG의 i 번째 성분

1. 서 론

가스유량측정에서 표준유동을 결정방법이 중량식인 경우 직접 교정 가능한 기준유량계(transfer meter)는 소너노즐뿐이다. 우리 나라의 경우 표준기관에서 중량식방법을 쓰고 있기 때문에 이로부터 표준유동율을 소급받는 교정점사기관의 기준기는 거의 대부분이 소너노즐로 되어 있다. 소너노즐로 흐르는 유량을 계산할 때 한 가지 어려운 점은 임계유동인자의 계산에 있다. 노즐 교정에 사용된 유동 매체와 사용 매체가 다를 경우 매우 정확한 임계유동인자가 요구되기 때문이다.

지금까지 임계유동인자 계산에는 Venix-Kobayashi (V-K) 압축계수 계산식을 기초로 한 Johnson식이 사용되어 왔으며, 표준규격서 ISO-9300⁽¹⁾에도 이 식을 권고하고 있다. 그러나 이 식은 특정조건에서 $\pm 0.5\%$ 이상의 오차가 생길 수 있음이 밝혀진 바 있고 일반적인 유동조건 - 거래용 천연가스 배관의 일반적인 온도, 압력, 가스 조성 등 - 에서도 $\pm 0.1 \sim \pm 0.2\%$ 의 오차를 발생할 수 있다고 보고되어 있다. 소너노즐이 다른 유량계를 교정하는 기준으로 사용한다는 점과 임계유동인자 외에 다른 인자들 또한 어느 정도 오

차를 갖고 있다는 것을 감안할 때 $\pm 0.1\%$ 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 상태 방정식이 도출되지 않은 데 있다.

정확한 가스압축계수를 예측하기 위해 GRI(Gas Research Institute, 미국)는 AGA (American Gas Association)와 공동으로 새로운 상태 방정식을 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 우리나라를 포함한 6개국에서 각기 상이한 방법으로 도출한 임계유동인자를 비교 분석하는 국제비교 연구가 수행되었다.

당공사도 한국표준과학연구원을 통하여 이 비교 연구에 참여하였고 또한 99년말에 천연가스 대유량 교정시스템(1차 기준기는 소너노즐)이 구축 완료 예정이어서 이에 필요한 정확한 임계유동인자를 계산하게 되었다.

이를 위해 현재까지 가장 정확하다고 알려진 천연가스 상태방정식 AGA-8(94)⁽²⁾을 이용하였고, 이상기체의 물성 계산 모델도 정확도 $\pm 0.05\%$ 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

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

$$Q_m = C_d \rho \cdot V \cdot A \cdot \quad (1)$$

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. 따라서 등엔트로피 관계식을 이용하여 식 (1)을 식 (2)로 변형하고 노즐 입구의 온도와 압력을 대신 측정하게 된다.

$$Q_m = C_d A \cdot C \cdot \frac{P_0}{\sqrt{RT_0}} \quad (2)$$

여기서, T_0 , P_0 는 정체온도와 정체압력을 각각 나타내는데 이 값들은 노즐 입구에서 측정한 온도와 정압으로부터 계산될 수 있다.

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

$$C = \rho \cdot V \cdot \frac{\sqrt{RT_0}}{P_0} \quad (3)$$

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 천연가스 뿐만 아니라 순수 메탄, 에탄, 이산화탄소, 질소, 수소의 압축계산에도 적용할 수 있다.

압축계수를 구하는 상태 방정식은 상당히 복잡해서 여기서 설명하기는 어렵고, 최종식만 기술하면 다음과 같다.

$$Z = 1 + \frac{DB}{K^2} - D \sum_{n=1}^{16} C_n T^{-n} \quad (4)$$

$$+ \sum_{n=1}^{16} C_n T^{-n} (b_n - c_n k_n D^{k_n}) D^{b_n} \exp(-c_n D^{k_n})$$

3.2 계산방법

식(3)에서 보는 바와 같이 임계유동인자를 계산하기 위해서는 정체압력 P_0 , 정체온도 T_0 , 노즐 목의 기체밀도 ρ 와 속도 V 를 알고 있어야 한다. P_0 , T_0 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.

임계유동인자 계산의 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 되고, 이 두 속도값이 일치할 때의 온도가 노즐 목의 온도가 된다는 개념이다.

기존 ISO 계산방법은 C_4 이상의 탄화수소물을 무시한 7가지 천연가스 성분만 고려하였고 각 성분의 임계유동인자로부터 도출된 간단한 경험식을 NG에 적용하였다. V-K 방정식의 오차가 상대적으로 커서 이러한 근사적인 방법으로도 전체 오차가 거의 증가하지 않는다는 점과 계산 시간을 크게 단축하기 위한 것으로 생각된다. 그러나 이러한 방법으로는 $\pm 0.1\%$ 대의 임계유동인자를 계산하기는 어려우며 따라서 본 계산과 같이 가스 내 성분이 모두 고려될 수 있도록 열역학 방정식을 완전히 푸는 방법을 사용해야한다. 그렇지만 이 방법은 다수의 노즐을 사용하여 유량계 교정을 할 경우 실시간으로 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 현재까지 가장 빠른 pc로도 임계유동인자 계산시간이 4~8초 정도 소요되기 때문이다.

임계유동인자를 계산하기 위해서는 식 (3), (4) 외에 다음과 같은 열역학적관계식^(3, 4)이 더 필요하다.

$$H_0 - H_* = \frac{v_*^2}{2} \quad (5)$$

$$S_0 - S_* = 0 \quad (6)$$

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

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 _i	-29776.4	-37524.1	-56072.1	-3495.34	20.73070	-10085.4
B _i	7.954540	7.981390	8.143190	6.955870	6.962370	7.946800
C _i	43.94170	24.36680	37.06290	0.272890	2.686450	-0.08380
D _i	1037.090	752.3200	735.4020	662.7380	500.3710	433.8010
E _i	1.563730	3.539900	9.381590	-0.29132	-2.56429	2.855390
F _i	813.2050	272.8460	247.1900	-680.562	-530.443	843.7920
G _i	-24.9027	8.447240	13.45560	1.789800	3.919210	6.315950
H _i	1019.980	1020.130	1454.780	1740.060	500.1980	1481.430
I _i	-10.1601	-13.2732	-11.7342	0.000000	2.132900	-2.88457
J _i	1070.140	869.5100	984.5180	100.0000	2197.220	1102.230
K _i	-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 _i	-72387.0	-72674.8	-91505.5	-83845.2	-94982.5	-103353.	-109676.	-122599.	-13773.1
B _i	17.8143	18.6383	21.3861	22.5012	26.6225	30.4029	34.0847	38.5014	7.97183
C _i	58.2062	57.4178	74.3410	69.5789	80.3819	90.6941	100.253	111.446	6.27078
D _i	1787.39	1792.73	1701.58	1719.58	1718.49	1669.32	1611.55	1646.48	2572.63
E _i	40.7621	38.6599	47.0587	46.2164	55.6598	63.2028	69.7675	80.5015	2.05010
F _i	808.645	814.151	775.899	802.174	802.069	786.001	768.847	781.588	1156.72
G _i	-44.1341	-46.1938	-60.2474	-62.2197	-77.5366	-92.0164	-106.149	-122.444	-3.24989

A_i in cal/mole, B_i in cal/mole-K; C_i in cal/mole-K, D_i in K; E_i in cal/mole-K, F_i in K
G_i in cal/mole-K, H_i in K, I_i in cal/mole-K, J_i in cal, K_i in cal/mole-K

$$H = H^0 + RT \left[(Z-1) - \int_0^p T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \frac{\partial p}{p} \right] \quad (8)$$

$$S = S^0 - R \ln(\rho R T) - R \int_0^p \left[(Z-1) + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \right] \frac{\partial p}{p} \quad (9)$$

$$C_v = (C_p^0 - R) - R \int_0^p \left[2T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p + T^2 \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_p \right] \frac{\partial p}{p} \quad (10)$$

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

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

① 노즐 목의 온도 T₀을 가정하고 식 (6)과 (9)를 이용하여 노즐 목의 밀도 ρ₀를 구한다.

② 단계 ①의 T₀와 ρ₀ 그리고 식 (8)을 이용하여 기체가 노즐로 흐를 때 생기는 엔탈피 변화량을 구한다.

③ 단계 ②에서 구한 엔탈피 변화량을 식 (5)에 대입하여 노즐 목의 기체속도 V₀를 구한다.

④ 단계 ①의 온도와 밀도 그리고 식 (7)을 이용하여 음속 a₀를 구한다.

⑤ 노즐 목의 속도 V₀과 음속 a₀를 비교한다. 만약 이 두 값이 일치하지 않으면 T₀를 변화시켜 허용한도(예) < 0.0005) 내로 일치할 때까지 위의 단계들을 반복한다.

3.3 이상기체의 열역학적 관계식

임계유동인자의 계산에 관련된 식 (5)~(11)은 이상기체에 관한 정압비열 C_p⁰, 엔탈피 H₀, 엔트로피 S₀와 관련되어 있다. 따라서 이들 값을 정확히 산출하는 것 또한 임계유동인자 계산에 필수적이다.

이상기체에 관한 일반적인 관계식은 Passut-Danner⁽⁵⁾가 제안한 식이 있으나 천연가스의 음속을 계산하기에는 정확도가 떨어지는 것으로 알려져 있다. 보다 정확한 식으로는 Aly-Lee

model⁽⁶⁾을 기초로 개발된 Macfall's model⁽⁷⁾이 있으며, 임계유동인자를 계산하기에 충분한 정확도를 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 이 식을 사용하였으며 다음과 같다.

$$C_p^0 = B_1 + \left[\frac{D_1}{T} \right]^2 + E_1 \left[\frac{F_1}{T} \right]^2 + G_1 \left[\frac{H_1}{T} \right]^2 + I_1 \left[\frac{J_1}{T} \right]^2 \quad (12)$$

$$H_1^0 = A_1 + B_1 T + C_1 D_1 \coth\left(\frac{D_1}{T}\right) - E_1 F_1 \tanh\left(\frac{F_1}{T}\right) + G_1 H_1 \coth\left(\frac{H_1}{T}\right) - I_1 J_1 \tanh\left(\frac{J_1}{T}\right) \quad (13)$$

$$S_1^0 = K_1 + B_1 \ln(T) + C_1 \left[\frac{D_1}{T} \coth\left(\frac{D_1}{T}\right) - \ln\left\{ \sinh\left(\frac{D_1}{T}\right) \right\} \right] - E_1 \left[\frac{F_1}{T} \tanh\left(\frac{F_1}{T}\right) - \ln\left\{ \cosh\left(\frac{F_1}{T}\right) \right\} \right] + G_1 \left[\frac{H_1}{T} \coth\left(\frac{H_1}{T}\right) - \ln\left\{ \sinh\left(\frac{H_1}{T}\right) \right\} \right] - I_1 \left[\frac{J_1}{T} \tanh\left(\frac{J_1}{T}\right) - \ln\left\{ \cosh\left(\frac{J_1}{T}\right) \right\} \right] \quad (14)$$

$$C_p^0 = \sum_{i=1}^n C_{pi}^0 x_i \quad (15)$$

$$H^0 = \sum_{i=1}^n H_i^0 x_i \quad (16)$$

$$S^0 = \sum_{i=1}^n S_i^0 x_i \quad (17)$$

Table 1에는 식 (12)~(14)에 있는 계수를 나타내었다. 여기에 없는 천연가스의 성분에 대해서는 Table 2에 있는 Aly-Lee model의 계수들 사용하며, 이 때 계수 G_i , I_i 는 '영'으로 하여 계산하면 된다.

4. 결과 및 고찰

본 계산 정확도를 확인하기 위해 메탄의 음속 측정값과 각국에서 계산한 임계유동인자와 비교하였다. 여기서 음속값을 비교한 이유는 이 값이 임계유동인자의 정확도에 결정적인 역할을 하기 때문에 계산값과 측정값을 비교해보면 간접적으로 임계유동인자의 정확도를 확인할 수 있기 때

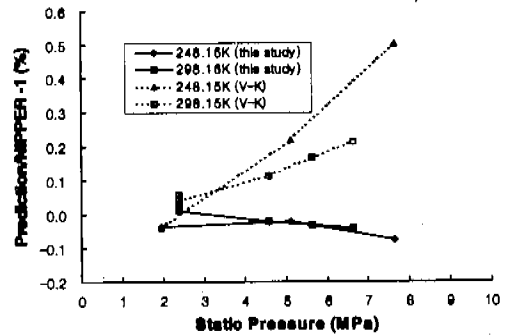


Fig. 1 Comparison of sonic velocity of methane between Nipper Data and Two Predictions.

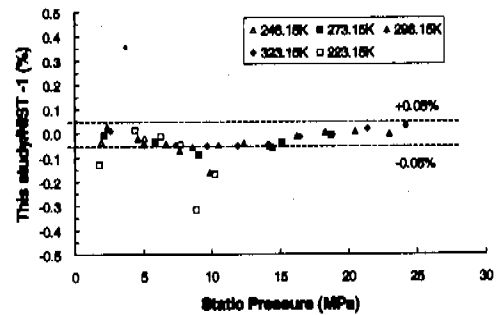


Fig. 2 Comparison of sonic velocity of methane between NIST experimental data and this study.

문이다.

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

Fig. 2는 미국표준연구소(NIST)의 메탄의 음속 측정값⁽⁹⁾과 비교한 결과이다. 온도영역 223K~423K, 압력은 25MPa까지의 음속 측정값과 편차를 비교했는데 250K 이상에서는 평균적으로

Table 3 Gas compositions of natural gas for international comparison of critical flow factors. (mole percent)

Component	Gas A	Gas B	Gas C	Gas D
CH ₄	82.916	93.301	88.36	94.33
C ₂ H ₆	13.665	3.585	8.55	1.25
C ₃ H ₈	1.052	0.567	2.04	0.32
IC ₄ H ₁₀	0.044	0.327	0.36	0.06
NC ₄ H ₁₀	0.066	0.073	0.01	0.01
IC ₅ H ₁₂	0.004	0.055	0.00	0.01
NC ₅ H ₁₂	0.004	0.019	0.00	0.00
C ₆ H ₁₄	0.002	0.052	0.00	0.00
C ₇ H ₁₆	0.003	0.073	0.00	0.01
N ₂	1.242	1.637	0.68	3.64
CO ₂	1.002	0.311	0.00	0.37

Table 4 International comparison result of critical flow factors of gas A.

T (K)	P (MPa)	CFF of this study ①	Deviation(%)†	Deviation(%)	Deviation(%)	Deviation(%)	Deviation(%)
			GDF ¹	K-Lab ²	NEL ³	SwRI ⁴	NOVA ⁵
273.15	0.1	0.66743	-0.0003	-0.0505	-0.0002	0.0011	-0.0509
	2	0.68866	-0.0016	-0.0610	-0.0014	0.0059	-0.0620
	5	0.73225	-0.0010	-0.0787	-0.0008	0.0043	-0.0770
	8	0.79402	-0.0018	-0.1004	-0.0014	0.0869	-0.0179
	10	0.84614	-0.0014	-0.1110	-0.0009	0.2857	0.1652
	15	0.96917	-0.0014	-0.1141	-0.0010	0.8598	0.7340
293.15	0.1	0.66583	-0.0014	-0.0284	-0.0014	0.0002	-0.0284
	2	0.68245	-0.0009	-0.0319	-0.0008	0.0147	-0.0246
	5	0.71414	-0.0014	-0.0405	-0.0013	0.0319	-0.0115
	8	0.75399	-0.0015	-0.0491	-0.0012	0.1046	0.0438
	10	0.78503	-0.0015	-0.0545	-0.0013	0.1789	0.1256
	15	0.86512	-0.0018	-0.0616	-0.0015	0.4666	0.3952

$$\dagger \left(\frac{x}{\text{①}} - 1 \right) \times 100$$

¹GDF: Gas de France (프랑스 가스회사), ²K-Lab: Karsto Metering & Technology Laboratory (노르웨이 계량연구소),

³NEL(National Engineering Laboratory, 영국 표준연구소), ⁴SwRI(Southwest Research Institute, 미국가스연구소)

⁵NOVA: 캐나다 가스회사

0.05%이하의 차이를 보이고 있다. 그러나 온도 250K이하 또는 고압에서는 0.1% 이상의 편차를 발견할 수 있는데 이는 AGA- 8('94)의 정확도가 이 영역에서 0.1%가 넘는 것으로 상당 부분 설명될 수 있다

Table 3과 4에는 임계유동인자 국제비교를 위한 천연가스 기준 조성과 비교 결과⁽¹⁰⁾가 나타나 있다. Table 4에는 천연가스 기준 조성 4가지 가운데 한 가지에 대한 결과만을 나타냈는데 이는 B, C, D가스에 대한 비교 결과도 이와 유사하기

때문이다. 본 계산결과를 비교해 보면 GDF, NEL의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 약간의 차이가 나는 것은 임계유동인자를 구할 때 수렴조건외 차이에서 비롯된 것으로 보이고 계산방법 전체가 거의 동일한 것으로 추측된다.

그러나 K-Lab과의 비교결과는 15 MPa에서 최대 -0.1% 정도 차이가 나며 SwRI와 NOVA의 결과와는 최대 -0.86%, -0.73%까지 각각 차이가 난다. 임계유동인자를 구하는 방법을 각 기관이 밝히지 않아 이러한 차이의 원인이 어디서 비롯됐

는지 알 수 없으나 주 원인은 압축계수계산식의 차이로 생각된다. AGA-8 (94)의 경우 압력 12~17MPa에서 정확도가 $\pm 0.3\%$ 정도인데 이 식과 반대 부호의 편향오차를 갖는 압축계수 계산식이 사용되었다면 증분이 발생할 수 있는 편차이기 때문이다. 그리고 이 중 0.1%정도의 차이는 가스 물성 모델과 세부 계산방법의 차이에서도 비롯될 수 있다.

그렇지만 대부분의 교정은 압력 8MPa 이하에서 이루어지기 때문에 8MPa 이상에서의 차이는 실제로 중요하지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 ISO 9300의 임계유동인자를 대신할 수 있는 보다 정확한 소닉노즐의 임계유동인자를 계산하고자 하였다. 이를 위해 현재까지 가장 정확하다고 알려진 천연가스 밀도계산코드 AGA-8(94)을 이용하였고, 이상기체의 물성계산 모델도 정확도 $\pm 0.05\%$ 이내의 계산식을 사용하였다. 또한 ISO의 방법에서 7가지 가스성분만이 고려된 것과 달리 천연가스 내 성분이 모두 고려될 수 있도록 열역학 방정식을 완전히 풀었다.

본 계산의 정확도를 확인하기 위해 메탄의 음속측정결과와 비교하였고 또한 국제비교연구도 수행하였다. 이러한 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 메탄의 음속측정값과 비교한 결과 천연가스 거래조건에서는 편차가 $\pm 0.05\%$ 이내였다. 일반적으로 천연가스 내 메탄의 함유량이 90%정도는 되므로 본 계산의 음속예측 정확도는 $\pm 0.1\%$ (=AGA-8의 정확도) 이내가 될 것이라고 잠정적으로 결론을 내릴 수 있고 음속과 밀접하게 관련된 임계유동인자의 정확도도 이와 유사하다고 판단할 수 있다.

(2) 임계유동인자의 국제비교결과 NEL, GDF의 계산 결과와 정확히 일치하였고 SwRI등 일부 기관의 계산값과는 압력 8MP이하에서 $\pm 0.1\%$ 정도 차이가 났다. 15MPa에서는 최대 -0.86% 정도까지 차이가 나지만 실제 교정이 이루어지는 압력은 8MPa 이하이고 압축계수의 정확도도 이 압력 영역에서는 $\pm 0.1\%$ 를 훨씬 넘기 때문에 실제적으로는 중요하지 않다.

따라서 본 연구에서 제시한 임계유동인자 계산 방법은 양호한 것으로 판단되며 높은 정확도가 요구되는 천연가스 유량측정에 ISO의 방법을 대신하여 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) ISO 9300, 1990, "Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles," Geneva
- (2) AGA Report No. 8, 1994, "Compressibility and Supercompressibility for Natural Gas and Other Hydrocarbon Gases," American Gas Association
- (3) Perry, R. H., Green, D. W., 1984, "Perry's Chemical Engineers' Handbook," McGraw Hill
- (4) Savidge, J. L. and Shen, J. J. S., 1989, "Evaluation of Critical Flow Factor and Speed of Sound Methods for Gas Measurement," Int. Gas Research Conference, Tokyo, Japan, November 6-9, p. 989.
- (5) Passut, C. A. and Danner, R. P., 1972, "Correlation of Ideal Gas Enthalpy Heat Capacity and Entropy," Ind. Engr. Chem. Proc. Des. Dev. Vol. 11, No. 4, p. 543.
- (6) Aly, F. A. and Lee, L. L., 1981, "Self Consistent Equations for Calculating the Ideal Gas Heat Capacity, Enthalpy and Entropy," Fluid Phase Equilibria, Vol. 6, p.169.
- (7) McFall, R. L., 1984, "Sonic Nozzle Flow Calculations for Natural Gas Using a Generalized Equation of State," University of Oklahoma, Master Thesis, Norman, Oklahoma
- (8) Sivaraman, A. and Bammon, B. E., 1982, "Speed of Sound measurements in methane," NIPPER-142.
- (9) Sivaraman, A. and Bammon, B. E., 1986, "Speed of Sound Measurements in Natural Gas Fluids," Gas Research Institute, Final Report, GRI-86/00043.
- (10) Park, K. A., 1998, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon City, Private Communication.