

천연가스의 음속, 비열, 엔탈피 계산

하영철[†] · 이철구

한국가스공사 연구개발원 유체유동연구실
(2001년 2월 27일 접수, 2001년 9월 27일 채택)

Calculations of Sonic Velocity, Specific Heat, Enthalpy for Natural Gas

Youngcheol Ha[†] and Cheolgu Lee

Fluid Flow Research Lab., R&D Training Center, KOGAS, Ansan 425-150, Korea
(Received 27 February 2001; accepted 27 September 2001)

요 약

본 연구는 천연가스 관련 업계에 필요한 음속, 비열, 엔탈피의 정확한 계산방법을 제시하고자 수행하였다. 이를 위해 실제 가스에 대한 이들 물성의 계산식을 유도하였고, 계산에 필요한 이상기체 물성과 천연가스 밀도는 Macfall 식(불확도 $\pm 0.05\%$)과 AGA 8-DC('94)(불확도 $\pm 0.1\%$) 식을 각각 사용하여 구하였다. 계산값의 불확도를 확인하기 위해, 음속의 경우 실험값과 비교하였고 비열과 엔탈피는 상대민감도를 이용하여 불확도 분석을 하였다. 그 결과 천연가스가 사용되는 대부분의 조건에서 $\pm 0.1\%$ 내외로 이들 물성값을 예측할 수 있음을 확인하였다.

Abstract – This study was conducted to suggest the highly accurate calculation method of sonic velocity, specific heat and enthalpy widely used in the natural gas industry. The equations of these properties for natural gas were derived, Macfall's eqs. (uncertainty $\pm 0.05\%$) and AGA 8-DC('94) eqs. (uncertainty $\pm 0.1\%$) were used for predicting the ideal gas properties and compressibility of natural gas needed to solve the equations. To verify the uncertainty of the calculated values, the sonic velocity was compared to the experimental data and the uncertainty analyses using the relative sensitivity method were performed for specific heat and enthalpy. The results showed that these properties were accurately predicted near $\pm 0.1\%$ in most flow conditions of natural gas.

Key words: Natural Gas, Sonic Velocity, Specific Heat, Enthalpy

1. 서 론

천연가스 시장이 성장함에 따라 보다 정확한 가스 물성값이 요구되고 있다. 과거에는 천연가스 상거래에 밀접한 초압축계수[1], 열량, 비중만이 중요한 인자로 인식되었지만 PNG(Pipelined Natural Gas) 도입과 유량계, 천연가스 자동차, 가스분석기 개발 사업이 국내에서도 본격화되면서 음속, 비열, 엔탈피의 물성값이 중요한 물성으로 부각되기 시작했다. 특히 음속은 대단히 중요한 물성으로 인식되고 있는데 PNG의 응축 여부를 실시간으로 감지하고, 천연가스 조성을 역으로 추론하며, 천연가스 자동차의 열량감지 센서와 관련되어 있고, 초음파 유량계의 측정 음속 비교용, 그리고 초정밀 유량계인 소닉노즐의 유량계산에 쓰이기 때문이다[2-4].

미국이나 유럽의 경우 천연가스 상거래는 1900년대 초반부터 이루어졌기 때문에 상거래와 관련된 열량, 비중, 초압축계수에 관한 물성 연구는 일찍이 수행되어 일정 정확도의 물성값을 계산할 수 있는 방법이 표

준문서화 되었다. 그렇지만 이들 나라에서도 이외의 물성에 대한 연구는 80년대 중반이 되어서야 정밀 실험이 이루어졌고 음속, 비열, 엔탈피 등의 계산에 기초가 되는 정확한($\pm 0.1\%$) 상태방정식은 92년도에 비로소 발표되었으며, 94년도에는 일부내용이 개정되었다[5]. 이 후 이를 기초로 정확한 물성계산식을 도출하는 작업이 이루어졌고 98-99년도에는 ISO 주관으로 비열, 음속, 엔탈피, 엔트로피 값으로부터 산출되는 임계유동인자의 국제 비교 연구가 수행되었다. 이 비교 연구에는 우리 나라(표준연구소를 통해 본 공사가 참여함) 포함한 6개국이 참여하였고[6], 비교 결과는 대부분의 조건에서 $\pm 0.1\%$ 이내로 일치하였다[7].

그러나 업계에서 필요로 하는 $\pm 0.1\%$ 근방의 상용 물성계산 프로그램은 아직까지 시판되지 않고 있으며 다소 부정확한 일부 상용 프로그램이 현재 사용되고 있다. 따라서 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 음속, 비열, 엔탈피(압축계수와 열량 및 비중은 표준규격서에 계산 방법이 명확히 제시되어 있어서 제외함)를 정확히 계산할 수 있는 방법과 관련 업계에서 물성계산을 할 때 기준이 되는 계산결과를 제시하고자 했다. 또한 계산된 각 물성값의 불확도가 영역 별로 어느 정도되는지를 분석하였고 임계유동인자 국제비교 결과를 통해 본 물성계산 방법의 적정성도 확인하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: fractals@kogas.or.kr

2. 이 론

2-1. 압축계수

압축계수 또는 밀도의 계산은 잘 알려진 바와 같이 AGA-8[5]이나 ISO-12213[8]을 이용하면 일정 온도, 압력 범위 내에서 불확도 $\pm 0.1\%$ 의 계산 값을 얻을 수 있다. 여기에 수록된 상태방정식은 2가지인데 하나는 일 반상거래 유동조건에 적용할 수 있도록 만든, 3차 비이열항까지만 정리 한 SGERG 방정식이고 다른 하나는 천연가스 조성을 모두 이용해서 계 산하는 AGA 8-DC(이하 DC)로 불리는 방정식이다. SGERG식은 비교 적 간단하고 불확도도 DC식과 동일하지만 적용 온도, 압력 범위가 제 한적이어서 본 연구에서는 DC 상태방정식만 사용하였다(DC의 경우 일 반적인 천연가스 상거래 조건-상온, 4 MPa까지-에서는 $\pm 0.03\%$ 의 불확 도를 나타내는 것으로 알려져 있음[9]).

식 (1)은 DC 상태방정식의 최종 식만 기술한 것이다. DC식 자체가 상 당히 복잡하고 기초 데이터 양도 많아서 여기서 자세히 다룰 수 없기 때문이며 이에 대한 자료는 AGA-8('94)와 ISO 12213('97)자료를 참고 하기 바란다.

$$z = 1 + \rho B - K^3 \rho \sum_{n=13}^{18} C_n T^{-u_n} + \sum_{n=13}^{58} C_n T^{-u_n} [b_n - c_n k_n (K^3 \rho)^{k_n}] D^{b_n} \exp[-c_n (K^3 \rho)^{k_n}] \quad (1)$$

2-2. 물성계산

실제 가스의 물성식은 열역학적 관계식으로부터 유도할 수 있다. 유 도 과정이 다소 복잡한 인자는 엔탈피와 엔트로피뿐이며 나머지 인자 는 이 두 식이나 간단한 관계식으로부터 유도할 수 있다. 엔탈피와 엔 트로피는 Perry 핸드북[10]의 식을 기본적으로 사용하였지만, 이상 기체 의 모델과 연결하기 위해 표현 방법을 달리했다. 이렇게 정리한 엔탈피 와 엔트로피 식은 각각 식 (2)와 (3)에 나타나 있다.

$$H = H^o + RT \left[(Z-1) - \int_0^p T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \frac{dp}{p} \right] \quad (2)$$

$$S = S^o - R \ln(pRT) - R \int_0^p \left\{ (Z-1) + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \right\} \frac{dp}{p} \quad (3')$$

정적비열과 정압비열은 열역학적 정의식인 식 (3'), (4')를 이용하여 (3') 을 미분하면 구할 수 있다. 여기서 식 (3')의 비체적 v 는 몰밀도 ρ 로 대 체할 수 있기 때문에 식 (3')를 그대로 미분하면 식 (3)을 얻을 수 있지만 식 (4')의 경우는 맥스웰 방정식을 이용하여 압력 P 가 비체적 v 가 되도록 변형해야 식 (3')로부터 유도된다.

$$C_v = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_v \quad (3'')$$

$$C_p = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p \quad (4')$$

$$C_v = (C_p^o - R) - R \int_0^p \left[2T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p + T^2 \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_p \right] \frac{dp}{p} \quad (3)$$

$$C_p = C_v + R \frac{\left[Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \right]^2}{\left[Z + p \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T \right]} \quad (4)$$

음속 또한 이에 대한 정의식인 식 (5')와 실제 가스의 상태방정식인 식 (5'')로부터 간단히 도출된다.

$$a = \sqrt{k \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T} \quad (5')$$

$$P = \frac{\rho Z R T}{M} \quad (5'')$$

$$a = \left[\frac{C_p R T}{C_v M} \left\{ Z + p \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T \right\} \right]^{1/2} \quad (5)$$

2-3. 이상기체의 열역학적 관계식

식 (2)-(5)는 이상기체에 관한 정압비열 C_p^o , 엔탈피 H^o 관련되어 있다. 따 라서 이들 값을 정확히 산출하는 것 또한 이들 물성 계산에 필수적이다. 이상기체 물성에 관한 정확한 식으로는 Aly와 Lee model[11]을 기초로 개발된 Macfall's model[12]이 있으며 천연가스 물성을 계산하는데는 충 분한 정확도를 갖고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 이 식을 사용하였으며 다음과 같다.

$$C_{pi}^o = B_i + C_i \left[\frac{\frac{D_i}{T}}{\sinh \frac{D_i}{T}} \right]^2 + E_i \left[\frac{\frac{F_i}{T}}{\cosh \frac{F_i}{T}} \right]^2 + G_i \left[\frac{\frac{H_i}{T}}{\sinh \frac{H_i}{T}} \right]^2 + I_i \left[\frac{\frac{J_i}{T}}{\cosh \frac{J_i}{T}} \right]^2 \quad (6)$$

$$H_i^o = A_i + B_i T + C_i D_i \coth \left(\frac{D_i}{T} \right) - E_i F_i \tanh \left(\frac{F_i}{T} \right) + G_i H_i \coth \left(\frac{H_i}{T} \right) - I_i J_i \tanh \left(\frac{J_i}{T} \right) \quad (7)$$

$$C_p^o = \sum_{i=1}^m C_{pi}^o x_i \quad (8)$$

$$H^o = \sum_{i=1}^m H_i^o x_i \quad (9)$$

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	NC 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

Table 3. Classification of Y^o and ΔY

	Y ^o	ΔY	Uncertainty of Y _o
Specific heat at constant pressure, C _p	C _p ^o	Remainder terms	±0.05% of reading
Specific heat at constant volume, C _v	C _p ^o -R	Remainder terms	±0.05% of reading
Enthalpy, H	H ^o	Remainder terms	±0.05% of reading

Uncertainty of compressibility is ±0.1% within the range defined in clause 3 except at 250 K. At 250 K, the uncertainty is ±0.3%

Table 1에는 식 (6)과 (7)에 있는 계수를 나타내었다. 여기에 없는 천연가스의 성분에 대해서는 Table 2에 있는 Aly-Lee model의 계수를 사용하며, 이때 계수 G_i, I_i는 '영'으로 하여 계산하면 된다.

2-4. 불확도 추론 방법

음속의 경우 불확도가 명기된 측정 데이터가 있어서 불확도를 추론하는데 어려움이 없다. 그러나 비열과 엔탈피는 직접 비교할 수 있는 자료가 없어서 이미 알려진 물성의 불확도와 상대민감도[13]로부터 추론해야 한다.

상대민감도는 독립변수 X의 1% 변화가 일으키는 종속변수 Y의 %변화를 의미한다. 그런데 이는 X값 1%의 불확도가 일으키는 Y값의 %불확도로도 해석 가능하므로 상대민감도와 X의 불확도를 안다면 이로부터 Y의 불확도를 대략적으로 추론하는게 가능하다. 또한 종속변수 Y가 X만의 함수라면 Y의 불확도는 이론적으로 거의 정확하게 추론될 수 있다. 본 연구에서 X는 불확도 인용이 가능한 압축계수가 되고 Y는 비열과 엔탈피가 되는데 이 두 물성은 압축계수만의 함수로 되어 있어서 상대민감도 분석을 통해 불확도를 정확히 추론할 수 있다. 여기서 비열과 엔탈피의 경우 불확도를 알고 있는 부분인 Y^o와 그렇지 않은 부분인 ΔY로 나눌 수 있다. 즉 이상기체와 관련된 부분은 불확도 인용이 가능한 부분이고 압축계수와 관련된 부분은 민감도 분석을 해야만 추론 가능한 부분이다. 따라서 비열과 엔탈피의 상대민감도 해석 및 불확도 추론은 각각 식 (10), (11)과 같이 압축계수와 관련된 항에 대해서만 수행하였고 전체 불확도 U_Y는 Y값에서 Y^o와 ΔY가 차지하는 비율로 가중치를 적용하여 식 (12)와 같이 산정하였다. 그리고 Table 3에는 각 계산 인자에 대한 Y^o, ΔY 그리고 Y^o에 대한 불확도가 명기되어 있다.

$$\theta(\%) = \frac{\partial \Delta Y}{\partial X} \cdot \frac{X}{\Delta Y} \quad (10)$$

$$U_{\Delta Y}(\%) \approx \theta \cdot U_X(\%) \quad (11)$$

$$U_Y(\%) = \sqrt{\left(\frac{Y^o}{Y} \cdot U_Y\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y}{Y} \cdot U_{\Delta Y}\right)^2} \quad (12)$$

3. 계산범위

본 계산의 온도, 압력 범위는 각각 250-350 K, 0.1-10 MPa로 하였다. 이는 인용할 수 있는 음속 측정 데이터가 대체로 이 영역인 이유도 있

Table 4. Natural gas compositions in mole percent for tes

Component	Amrillo Gas ㉠	Statoil Gas ㉡
Methane	90.708	83.980
Ethane	4.491	13.475
Propane	0.815	0.943
Normal butane	0.141	0.067
Isobutane	0.106	0.040
Normal pentane	0.065	0.008
Isopentane	0.027	0.013
Normal hexane	0.034	-
Nitrogen	3.113	0.718
Carbon dioxide	0.500	0.756

Uncertainties of gas analysis are average ±0.1%

지만, 소닉노즐 목의 유동 조건, 음속을 이용한 천연가스 조성 예측, 일반적인 천연가스 상거래 조건, PNG의 유동조건 등을 모두 포함할 수 있는 온도, 압력 영역이기 때문이다.

계산에 사용된 천연가스 조성은 NIST(미국표준연구소)에서 음속 측정용으로 사용한 4가지 혼합가스[14] 중 2가지를 선택하였다. 하나는 Amarillo 산 가스(이하 가스 ㉠)로서 국내에 도입되는 천연가스 조성 과 가장 가까운 것이며[15] 다른 하나는 Statoil 산 가스(이하 가스 ㉡)로서 향후 공급될 동해 가스나 이루크르크 산 PNG의 고탄화수소물 함량을 충분히 반영하기 위함이다[16](Table 4참조). 가스 ㉠, ㉡는 음속 계산결과를 측정값과 비교할 때 모두 사용되었고, 비열과 엔탈피의 불확도 분석에는 가스 ㉡만 사용하였다. 이렇게 한 이유는 메탄 함량이 작은 -고탄화수소물의 함량이 큰- 가스의 물성계산 불확도가 일반적으로 크게 나타나기 때문에 측정자료가 없는 비열과 엔탈피의 불확도 크기를 충분히 산정하기 위함이다.

4. 계산결과 및 고찰

4-1. 음속

Fig. 1(a), (b)는 본 연구의 계산결과와 NIST(미국표준연구소)의 음속 측정값[14]을 비교한 것이다. NIST 음속값은 원통형 공진기를 이용하여 측정된 것으로 온도 250-350 K, 압력 0-100 MPa의 영역에서 ±0.05%의 불확도를 나타낸다.

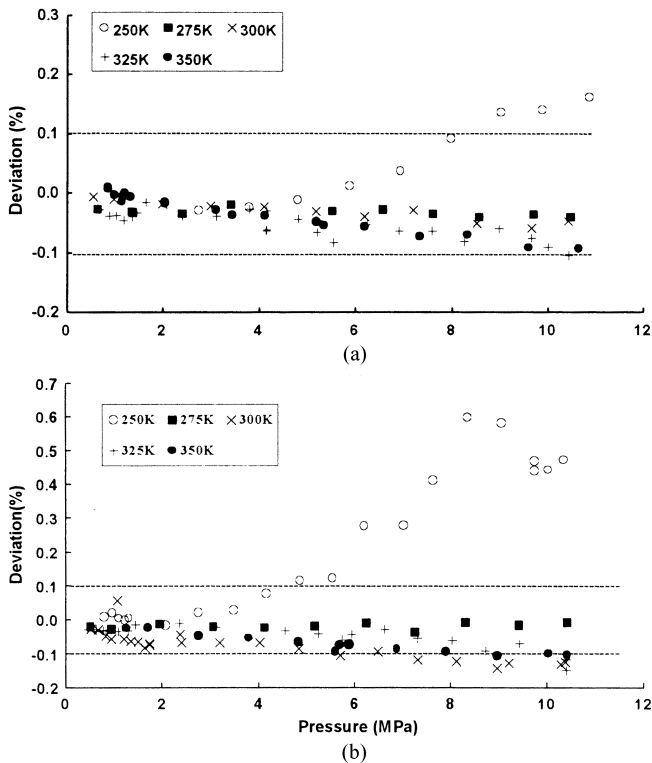


Fig. 1. (a) Comparison of sonic velocity of Gas A between this study and NIST measurement data. (b) Comparison of sonic velocity of Gas B between this study and NIST measurement data.

측정 음속값과 계산값을 비교해보면 온도가 250 K일 때를 제외하고는 평균적으로 $\pm 0.1\%$ 내외로 일치하는 것을 알 수 있다. 가스조성에 따라서 약간의 차이를 보이지만 250 K의 데이터를 제외하고는 가스 A, B에 대해 거의 차이가 없는 것을 관찰할 수 있다. 온도 250 K에서 음속값 차이는, 가스 A의 경우 8 MPa, 가스 B는 5 MPa 근방부터 0.1% 이상임을 관찰할 수 있으며 특히 가스 B의 경우는 8 MPa 근방에서 최대 0.6%의 차이를 나타낸다. 이러한 차이의 근본 원인은 압축계수의 불확도가 이 온도에서 $\pm 0.3\%$ 인 것에서 비롯되는 것으로 판단되며 계산에 쓰인 인자별로는 정압비열의 불확도가 가장 큰 원인으로 판단된다. 이는 Fig. 3에서 250 K의 정압비열 불확도 경향이 Fig. 1(b)와 유사하고 최대 불확도가 $\pm 0.3\%$ 넘는 데서 찾을 수 있다. 그렇지만 압축계수와 정압비열의 불확도를 고려한다해도 0.6% 정도의 음속값 차이를 설명하기는 어려운데(이들 값이 음속 계산에 제공근으로 들어가기 때문에 음속값에 미치는 영향은 각 불확도의 1/2 크기임) 이는 가스 A, B의 조성 분석 불확도가

Table 5. Calculation results of sonic velocity for Gas A, B

Temperature (K)	Pressures (MPa)	Gas A (m/s)	Gas B (m/s)
250	0.1	392.651	380.332
	5.0	361.581	339.159
	10.0	370.635	359.739
273	0.1	409.271	396.273
	5.0	388.214	367.703
	10.0	391.903	370.199
300	0.1	427.404	413.676
	5.0	414.263	394.776
	10.0	418.336	396.020

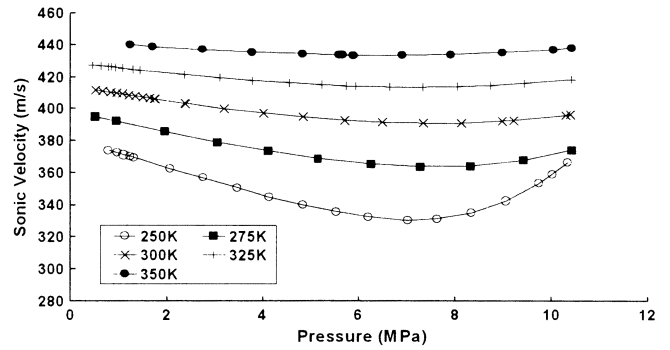


Fig. 2. Predictions of sonic velocity at different pressures and temperatures for Gas B.

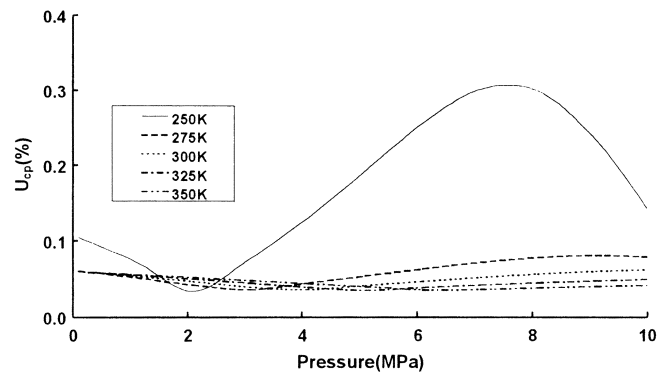


Fig. 3. Uncertainties of predictions of specific heat, C_p at different pressures and temperatures for Gas B.

평균 $\pm 0.1\%$ 인 데서 추가적인 오차가 발생된 것으로 판단된다.

Table 5는 본 연구에서 제시한 방법으로 온도, 압력에 따른 음속값을 계산한 결과이며, 이를 보다 자세히 나타낸 것이 Fig. 2이다. 온도에 따른 음속변화를 살펴보면 식 (5)로 예측되는 바와 같이 온도 증가에 따라 음속값도 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 압력에 따라서는 일정 압력까지 음속값이 점차 감소하다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있다.

4-2. 비열

Fig. 3은 본 방법으로 계산할 때 예상되는 정압비열의 불확도를 온도, 압력에 따라 나타낸 것이다. 온도에 따른 불확도 변화는 250 K일 때를 제외하고는 거의 없는 것을 관찰할 수 있으며 압력에 따른 불확도 변화도 마찬가지로 볼 수 있다. 불확도의 크기는 $\pm 0.1\%$ 미만으로 압축계수의 불확도보다 작은 것을 관찰할 수 있다.

그러나 온도 250 K에서의 불확도는 압력 4 MPa 근방부터 $\pm 0.1\%$ 를

Table 6. Calculation results of specific heat at constant pressure for Gas B

Temperature (K)	Pressures (MPa)	Specific heat at constant pressure (J/mol-K)
250	0.1	36.5021
	5.0	55.4796
	10.0	98.9814
273	0.1	37.3608
	5.0	49.0304
	10.0	70.9576
300	0.1	38.5871
	5.0	46.3408
	10.0	57.7468

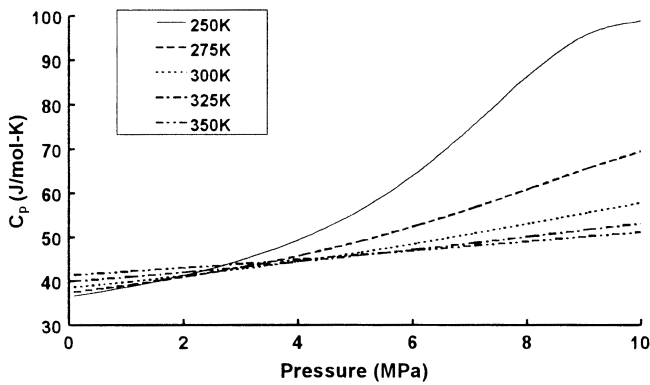


Fig. 4. Predictions of specific heat, C_p at different pressures and temperatures for Gas B.

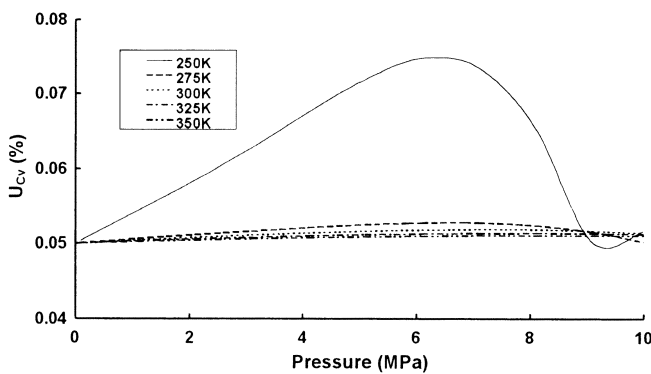


Fig. 5. Uncertainties of predictions of specific heat, C_p at different pressures and temperatures for Gas B.

초과하여 8 MPa 근방에서는 $\pm 0.3\%$ 가 넘는 것을 관찰할 수 있다. 이는 압축계수의 불확도가 이 온도에서 $\pm 0.3\%$ 인 것과, 정압비열이 압축계수와 관련된 항의 제곱으로 계산되는 데서 비롯된 것으로 판단된다(제곱항은 불확도를 2배 증폭시킴).

Table 6과 Fig. 4는 온도 압력에 따른 정압비열을 계산하여 나타낸 것이다. 온도에 따른 정압비열의 크기 변화는 일정 압력(여기서는 2-4 MPa 근방)까지는 증가하다가 이후부터는 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 압력에 따라서는 낮은 온도일수록 큰 폭으로 증가하는데 온도 250 K의 10 MPa에서는 이상기체의 정압비열에 비해 약 3배나 큰 것을 관찰할 수 있다(압력효과가 큼).

Fig. 5는 정적비열의 불확도 분포를 온도, 압력에 따라 계산하여 나타낸 것이다. 250 K의 불확도를 제외하고는 모두 $\pm 0.05\%$ (이상기체의 정

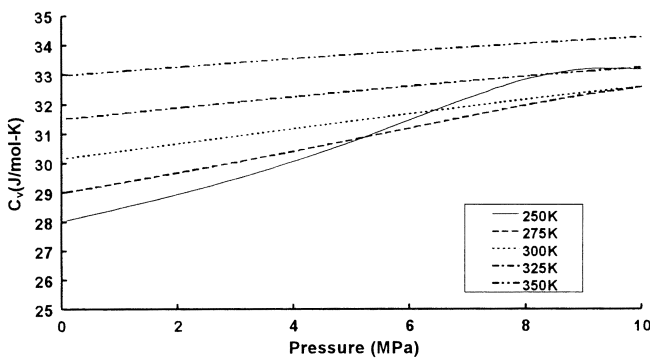


Fig. 6. Predictions of specific heat, C_v at different pressures and temperatures for Gas B.

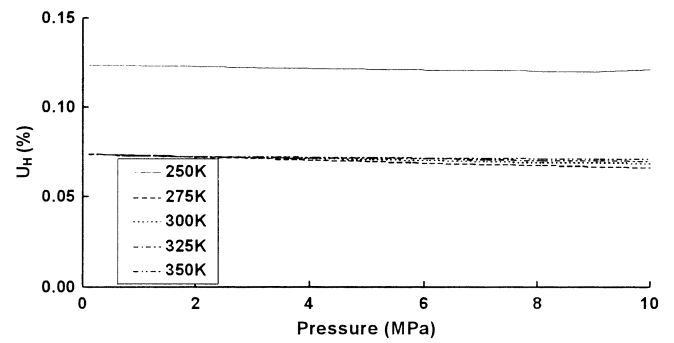


Fig. 7. Uncertainties of predictions of enthalpy at different pressures and temperatures for Gas B.

Table 7. Calculation results of enthalpy for Gas B

Temperature (K)	Pressures (MPa)	Specific heat at constant pressure (J/mol)
250	0.1	8485.85
	5.0	6842.89
	10.0	4549.78
273	0.1	9334.93
	5.0	8032.25
	10.0	6466.52
300	0.1	10359.7
	5.0	9313.14
	10.0	8173.84

압비열 불확도) 정도인 것을 알 수 있는데 이는 압축계수와 관련된 항의 크기는 작고, 상대민감도도 1보다 작아서 비롯된 결과이다. 이로 인해 250 K에서 불확도의 크기(압축계수 불확도 $\pm 0.3\%$)도 이상기체(압력 고려를 안했을 때)의 불확도에 비해 최대 0.025% 정도만 증가할 뿐이다.

Fig. 6은 온도, 압력에 따른 정적비열의 변화를 나타낸 것이다. 온도에 따라 정적비열의 크기가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 압력에 따라서는 정적비열이 증가하지만 정압비열에 비해 상당히 소폭이고(압력효과가 작음) 증가율은 온도가 낮을수록 다소 커지는 것을 관찰할 수 있다.

4-3. 엔탈피

Fig. 7은 엔탈피의 온도, 압력에 따른 불확도 분포를 나타낸 것이다. 압력에 따른 불확도 변화는 거의 없으며, 온도에 따른 불확도도 250 K 일 때를 제외하고는 거의 없음을 관찰할 수 있다. 불확도의 크기는 250 K에서 $\pm 0.13\%$ 이하이며 나머지 온도에서는 약 $\pm 0.07\%$ 정도 된다. 엔탈피 계산과 관련하여 한 가지 흥미로운 사실은 250 K의 엔탈피를 구할 때

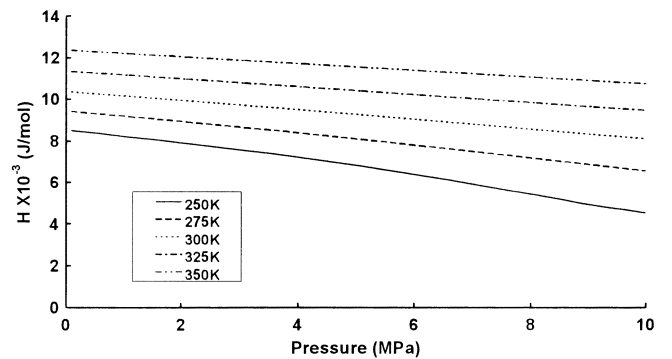


Fig. 8. Predictions of enthalpy at different pressures and temperatures for Gas B.

Table 8. International comparison result of Critical Flow Factors(CFF)

T(K)	P(MPa)	CFF of KOGAS, °C	Deviation(%)†, \bar{D}				
			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	0.68866	-0.0016	-0.0610	-0.0014	0.0059	-0.0620
	5.0	0.73225	-0.0010	-0.0787	-0.0008	0.0043	-0.0770
	8.0	0.79402	-0.0018	-0.1004	-0.0014	0.0869	-0.0179
	10.0	0.84614	-0.0014	-0.1110	-0.0009	0.2857	0.1652
293.15	0.1	0.66583	-0.0014	-0.0284	-0.0014	0.0002	-0.0284
	2.0	0.68245	-0.0009	-0.0319	-0.0008	0.0147	-0.0246
	5.0	0.71414	-0.0014	-0.0405	-0.0013	0.0319	-0.0115
	8.0	0.75399	-0.0015	-0.0491	-0.0012	0.1046	0.0438
	10.0	0.78503	-0.0015	-0.0545	-0.0013	0.1789	0.1256

¹GDF: Gas de France(France), ²K-Lab: Karsto Metering & Technology Laboratory(Norway), ³NEL: National Engineering Laboratory(England), ⁴SwRI(Southwest Research Institute, USA), ⁵NOVA: Canada gas company(Canada)

† $[\bar{D}/\bar{C}-1] \times 100$

정압비열을 따로 구한 후 계산하는 것보다 엔탈피를 직접 구하는 것이 보다 정확하다는 점이다(Fig. 3참조).

Table 7과 Fig. 8은 온도 압력에 따른 엔탈피를 계산하여 나타낸 것이다. 온도 증가에 따라 엔탈피 값이 증가하며, 압력에 따라서는 완만하게 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

4-4. 물성계산 방법의 검증

Table 8은 98-99년도에 ISO 주관으로 수행된 임계유동인자의 국제비교결과[7]이다. 임계유동인자 계산에는 음속, 비열, 엔탈피, 엔트로피식이 모두 사용되는데 본 공사(KOGAS)가 이를 계산할 때 상기 물성계산 방법을 그대로 사용하였다. 비교결과를 살펴보면 모든 온도 압력에서 GDF와 NEL과 결과와는 일치함을 알 수 있다. 그러나 K-Lab과는 10 MPa에서 최대 -0.1% 정도차이 나며 SwRI와 NOVA의 결과와는 최대 -0.29%, -0.17%까지 각각 차이가 난다. 임계유동인자를 구하는 방법을 각 기관이 밝히지 않아 이러한 차이의 원인이 어디서 비롯되었는지는 알 수 없으나, 주 원인은 상태방정식과 음속식 차이에서 비롯되는 것으로 판단된다. 그러나 일반적으로 천연가스의 유동 조건이 8 MPa이하라는 점을 감안하면 평균 $\pm 0.1\%$ 이내로 일치한다고 볼 수 있으며 따라서 본 연구의 물성계산 방법은 타당하다고 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 천연가스 관련업계에서 필요한 고정도의 음속, 비열, 엔탈피 계산 방법을 제시하고자 했다. 이를 위해 현재까지 가장 정확하다고 알려진 AGA 8-DC 상태방정식을 사용하고 실재가스의 음속, 비열, 엔탈피식을 유도했으며 이상기체의 물성도 불확도 $\pm 0.05\%$ 모델을 사용하였다. 또한 계산된 물성의 불확도를 확인하기 위해, 음속의 경우 실험값과 비교했으며 비열과 엔탈피는 불확도 분석을 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 음속계산의 불확도는 본 계산범위에서 온도 250 K를 제외하고는 모두 $\pm 0.1\%$ 내외로²⁾ 확인되었다. 250 K에서의 불확도는 압력에 따라 다르게 나타나는데, 향후 국내에 도입될 가스조성을 감안하면 5 MPa까지만 불확도 $\pm 0.1\%$ 이내로 유지되고 이후부터는 $\pm 0.1\%$ 를 크게 상회한다고 보면 타당할 것이다.

둘째, 정적비열의 불확도는 모두 $\pm 0.1\%$ 로 이내로 확인되었다. 정압비열의 경우도 250 K를 제외하고는 모두 $\pm 0.1\%$ 이었으며 250 K에서는 최대 $\pm 0.3\%$ 의 불확도 나타남을 확인하였다.

셋째, 엔탈피의 불확도는 250 K일 때를 제외하고는 $\pm 0.1\%$ 이내임을 확인하였고 250 K에서도 $\pm 0.12\%$ 에 불과함을 확인하였다.

넷째, 임계유동인자 국제비교결과를 통해 본 물성 계산방법이 정확하다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.

사용기호

a	: sonic velocity [m/s]
b_n	: equation of state parameter [-]
B	: second virial coefficient [m ³ /mol]
c_n	: equation of state parameter [-]
C_n^*	: coefficients which are functions of composition [-]
C_p	: specific heat at constant pressure [J/mol-K]
C_v	: specific heat at constant volume [J/mol-K]
D	: reduced density [-]
H	: enthalpy [J/mol]
k_n	: equation of state parameter [-]
K	: size parameter [MJ · m ³]
m	: number of NG components
M	: molar mass of NG [kg/mol]
P	: absolute pressure [Pa]
S	: entropy [J/mol-K]
T	: absolute temperature [K]
R	: universal gas constant [J/mol-K]
U	: uncertainty [-]
u_n	: equation of state parameter [-]
w	: weighting factor ($0 \leq w \leq 1$) [-]
x	: mole fraction of NG [-]
Z	: compressibility factor [-]

그리스 문자

κ	: specific heat ratio($=C_p/C_v$) [-]
ρ	: molar density [kmol/m ³]
Σ	: summation [-]
θ	: relative sensitivity [-]
v	: specific volume [m ³ /kmol]

상첨자

o	: ideal gas
---	-------------

²⁾[측정값의 불확도²+측정값과의 차이²]^{1/2}.

하첨자

i : ith component of NG

참고문헌

1. Zimmerman, R. H.: Par Research Project NX-19, American Gas Association(1962).
2. Lueptow, R. M. and Scott, P.: GRI Report No. 94/0135, Gas Research Institute, USA(1994).
3. Grimley, T. A.: GRI Report No. 96/0291, Gas Research Institute, USA (1996).
4. Savidge, J. L.: International Gas Research Conference, Tokyo, Japan 989(1989).
5. AGA Report No. 8, American Gas Association(1994).
6. Ha, Y. C. and Her, J. Y.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 582(1999).
7. Park, K. A.: Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon City, Private Communication(1999).
8. ISO 12213, International Organization for Standardization, Geneva(1997).
9. Thomas, J. B.: GRI Report No. 93/0396, Gas Research Institute, USA (1993).
10. Perry, R. H.: "Perry's Chemical Engineers' Handbook," 6th ed., McGraw-Hill Company, 5-5, 4-66(1987).
11. Aly, F. A. and Lee, L. L.: *Fluid phase Equilibria*, **6**, 169(1981).
12. McFall, R. L.: Master Thesis, University of Oklahoma, Oklahoma, USA(1984).
13. ISO/TR 5168, International Organization for Standardization, Geneva (1998).
14. Younglove, B. A., Frederick, N. V. and McCarty, R. D.: NIST Monograph 178, National Institute of Standards and Technology, USA(1993).
15. "Daily Report for Gas Analysis," Korea Gas Corporation(1999).
16. Her, J. Y. and Lee, Y. C. et al.: Kogas Project No. 00-KA-PI-수시-031-00, Korea Gas Corporation(2000).