



## 가스 배관내 가스 컨덴세이트의 발생 시작점 및 발생량 예측을 위한 통계 모델 연구

†장 승 용

(주)카프나

(2006년 8월 8일 접수, 2006년 10월 3일 채택)

## A Statistical Model for Predicting Incipient Point and Quantity of Gas Condensate in Gas Pipelines

†Seungyong Chang

KAPNA Corp.

(Received 8 August 2006, Accepted 3 October 2006)

### 요 약

가스 소비의 급증으로 천연가스의 수송수단인 배관의 역할이 증가하고 있다. 일반적으로 배관으로 가스를 수송할 경우, 주로 컨덴세이트 형성에 기인하는 일부 액체가 관 내에 형성되어 가스 산업현장에서 복잡한 조업 상의 문제점을 발생시킨다. 그러므로, 가스 컨덴세이트의 존재가 조업 효율에 미치는 영향을 예측할 수 있는 적절한 방법이 필요하다. 본 연구에서는 통합된 단상/2상 유동개념을 사용하여 가스 컨덴세이트의 발생 시작점과 그 발생량의 영향이 출구 압력에 미치는 영향을 분석할 수 있는 통계 모델을 개발하였다. 또한 컨덴세이트 발생 시작점 이후, 2상 유동지역에서 유동형태의 변화가 출구 압력에 미치는 영향도 분석되었다.

**Abstract** – With the rapid increase in gas consumption, the role of pipelines as a transportation means of natural gas is increasing. In general, when natural gas is being transported in pipelines, some liquid mainly from formation of condensate is introduced and this phenomenon makes operational problems more complex in the gas industry. Thus, an appropriate method is necessary for predicting the effect of presence of gas condensate on operational efficiency. In this study, a statistical model was developed using an integrated single- and two-phase flows concept. Using this model, the effects of the incipient point of gas condensate and its quantity on outlet pressure were analyzed. Also, the effect of variations of flow regimes in two-phase region on outlet pressure after the incipient point was analyzed.

**Key words** : Condensate, Incipient point, Two-phase, Flow regime

### I. 서 론

천연가스는 현재 중요한 에너지 원이며, 그 수요량은 전세계적으로 급속히 증가하고 있다. 이러한 급속한 증가로 천연가스의 수송수단인 배관의 역할은 증가하고 있다.

일반적으로 천연가스가 배관으로 수송될 때 주로 컨덴세이트 형성으로 발생되는 액체가 배관 내에 생성되며, 이러한 현상은 가스 산업현장에서 더욱 복잡한 조업 문제를 발생시키는데, 특히 해상 현장에서 그 영향

이 더욱 두드러진다. 그러므로 가스 컨덴세이트의 존재가 현장 조업에 미치는 영향을 이해하기 위하여 가스 컨덴세이트 거동을 예측할 수 있는 적절한 방법이 요구되며, 이러한 예측을 위하여 통합된 단상/2상 유동의 수력학적 모델이 필요하다.

본 연구에서는 단상 유동과 2상 유동을 결합시킨 통계모델을 개발하였으며, 개발된 모델을 이용하여 가스 컨덴세이트의 발생 시작점과 그 발생량이 출구압력에 미치는 영향을 분석하였다.

또한 컨덴세이트 발생 시작점 이후 2상 유동 지역에서 유동형태 변화가 출구압력에 미치는 영향도 함께 분석하였다. 최종적으로 임의의 조건에서 컨덴세이트 발

†주저자:csydr@hanmail.net

생 시작점과 발생량을 예측하기 위하여 복수 회귀분석 기법을 이용하였으며, 출구압력, 컨덴세이트 발생 시작점 및 발생량의 결과들을 입력 데이터와 함께 보정하여 새로운 관계식을 도출하였다.

## II. 이 론

### 2.1. 통합 단상/2상 유동 모델

본 연구에서 컨덴세이트 발생 시작점 이전의 단상 유동지역에서 지형적인 영향을 고려하기 위하여 보정된 Weymouth 식을 사용하였으며[1], 그 이후 지역은 Begge & Brill 식을 사용하였다[2,3].

가스/가스 컨덴세이트 유동 시 가능한 유동 형태는 무화유동(mist flow)과 성층유동(stratified flow)이다[4]. Beggs & Brill 식으로부터 성층유동과 무화유동은 각각 분리유동(segregated flow)과 분산유동(distributed flow)으로 분류되며, 본 연구에서의 유동형태 분류법은 Begge & Brill 분류법을 이용하였다.

### 컨덴세이트 발생 시작점 및 발생량 가정

본 연구에서 컨덴세이트 발생 시작점은 전체 배관 길이의 비율로 설정하였으며, 발생 시작점을 배관길이의 0.1~0.9까지 변경하였다.

컨덴세이트 발생 시작점의 변화는 단상 유동지역과 2상 유동지역의 길이를 변경시켜 궁극적으로 전체 압력손실 값에 영향을 주므로 컨덴세이트 발생 시작점에 따른 배관 내의 압력손실을 산출하였다.

가스 컨덴세이트 발생량의 경우 천연가스 산업현장에서 배관 내에 발생하는 일반적인 양은 대략 0~15 vol%로 알려져 있으며[5], 무화유동의 경우 액체 체류량(liquid holdup) 범위는 0~5%이다[6].

### 2.2. 통계적 접근방법

본 연구에서는 일부 통계적인 접근방법이 압력손실 값과 컨덴세이트 발생량에 대한 통계적 모델을 만들기 위하여 사용되었다[7,8]. 첫 번째로, 얼마나 많은 요소(변수)들을 모델에 포함시켜야 하는지 여부를 분석하기 위한 요소 분석(factor analysis)이 시도되었다.

전체적으로, 압력손실, 가스 유량, 입구압력, 배관 길이, 내부 환경, 유동 온도, 경사각, 컨덴세이트 발생량, 가스 비중 및 컨덴세이트 발생 시작점 등 열개의 변수들이 사용되었다.

그리고 각 변수들을 포함시킬 것인지 여부에 대한 기준으로 scree test를 사용하였다. Fig. 1은 이러한 scree test의 결과를 나타낸다.

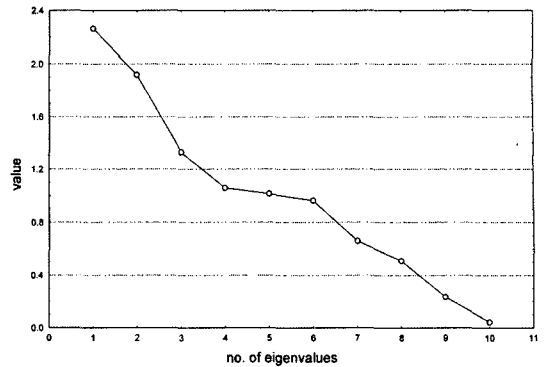


Fig. 1. The scree test for variables.

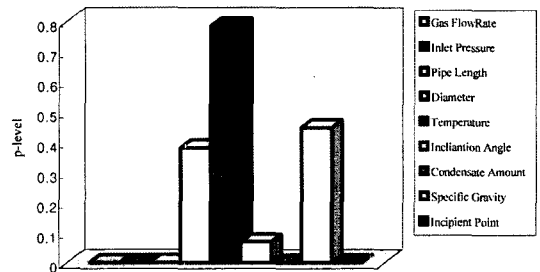


Fig. 2. P-level for variables.

이 그림으로부터 고려된 모든 변수들이 포함되어야 함을 알 수 있다. 요소분석을 완료한 후 독립변수들과 종속변수들의 관계를 도출하기 위하여 복수 회귀분석(multiple regression)을 사용하였다.

각 독립변수의 선형성을 검토하기 위하여 우선적으로 선형 복수 회귀분석을 적용하여 P-level로부터 각 변수의 선형성을 분석하였다.

Fig. 2는 각 변수의 P-level을 보여주며, 여기서 환경, 온도, 경사각 및 가스 비중은 종속변수인 압력손실과 비선형성을 나타냄을 알 수 있다.

P-level로부터 비선형 변수들을 추출하고, 추출된 변수들에 비선형성을 적용하였다. 최종적으로, 이러한 접근방법을 이용하여 종속 변수인 압력손실에 대하여 유도된 방정식은 다음과 같다.

$$\Delta p = a_1 + a_2 Q_g + a_3 p_{in} + a_4 L + a_5 (1/d) + a_6 T^2 + a_7 \alpha^4 + a_8 CF + a_9 \sqrt{\gamma_g} + a_{10} IP \quad (1)$$

여기서  $a_1 = -365.190$ ,  $a_2 = 0.035835$ ,  $a_3 = 0.091476$ ,  $a_4 = 0.038029$ ,  $a_5 = 6.620969$ ,  $a_6 = 0.003397$ ,  $a_7 = -0.000001$ ,  $a_8 = 1831.461$ ,  $a_9 = 127.1886$ ,  $a_{10} = -0.164797$ 이다.

본 연구에서는 234개의 데이터가 분석에 사용되었고

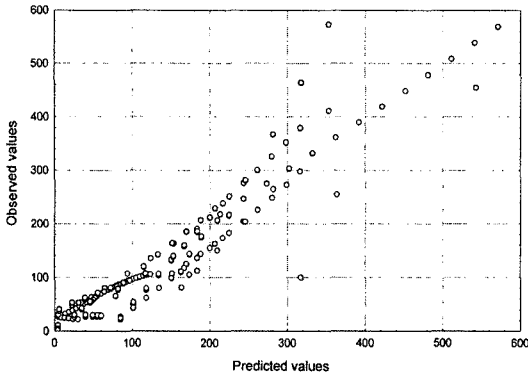


Fig. 3. Observed versus predicted values of pressure drops.

수렴한계는 0.0001로 설정하였으며 예측방법으로 Quasi-Newton 법을 사용하였다. 모델이 얼마나 데이터와 잘 들어 맞는지를 나타내는 척도인 결정계수(R-square)는 약 90%를 나타내었다.

Fig. 3은 식 (1)에서 압력손실에 대한 측정값과 예측값을 비교한 것으로 모델의 수행결과가 타당함을 보여 준다.

그리고, 위와 동일한 모든 통계절차를 가스 컨덴세이트 발생량을 종속변수로 하여 적용하였다. 이러한 분석 결과, 분기점을 이용한 단계적 선형 회귀분석은 가스 컨덴세이트 발생량을 예측하기 위한 무화/성충유동에 대하여 적절함을 알 수 있었다.

이러한 방법은 두 개의 분리된 선형 회귀분석 방정식을 예측하는데 하나는 분기점보다 작거나 동일한 종속변수 값에 대한 것이고, 다른 것은 분기점보다 큰 종속변수 값에 대한 것이다. 이러한 분석에서 분기점은 0.049444이었으며, 이 값은 무화유동과 성충유동 사이의 경계와 거의 일치하였으므로, 분기점을 0.05로 설정하였다.

이러한 분석을 통하여 유동형태에 따른 가스 컨덴세이트 발생량을 산출하기 위한 식은 다음과 같이 표현할 수 있었다.

$$CF = b_1 + b_2 Q_g + b_3 p_{in} + b_4 L + b_5 d + b_6 T + b_7 \alpha + b_8 \gamma_g + b_9 \Delta p \quad (2)$$

그 결과,  $CF \leq 0.05$ (무화유동)일 경우에는  $b_1 = 0.101424$ ,  $b_2 = -0.000006$ ,  $b_3 = -0.000019$ ,  $b_4 = -0.000006$ ,  $b_5 = 0.000226$ ,  $b_6 = -0.000094$ ,  $b_7 = 0.000038$ ,  $b_8 = -0.038482$ ,  $b_9 = 0.000211$ 이었다.

또한  $CF > 0.05$ (성충유동)일 경우에는  $b_1 = 7.003057$ ,  $b_2 = -0.000008$ ,  $b_3 = 1074.459$ ,  $b_4 = -768.696$ ,  $b_5 =$

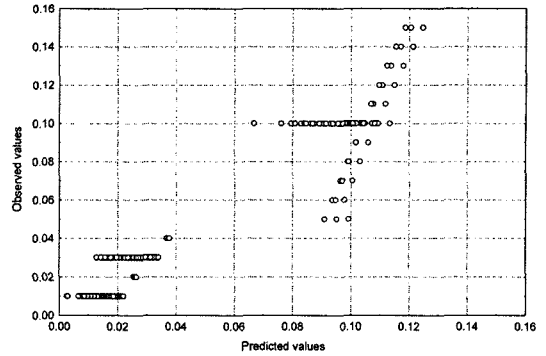


Fig. 4. Observed versus predicted values of condensate quantities.

41.28357,  $b_6 = 326.3967$ ,  $b_7 = 0.000406$ ,  $b_8 = -0.041878$ ,  $b_9 = 0.000125$ 이었다.

Fig. 4는 식 (2)에서 가스 컨덴세이트 발생량에 대하여 측정값과 예측값을 비교한 것이며, 이 모델은 약 93%의 R-square 값을 보여 주었다.

### 2.3. 산출 절차

주어진 조건에서 적절한 가스 컨덴세이트 발생 시작점과 발생량을 예측하기 위한 식 (1)과 식 (2)를 사용하기 위하여 아래의 절차를 사용하였다.

- 1) IP 가정
- 2) 식 (1)로부터 CF를 산출하여  $CF_1$ 으로 설정
- 3)  $CF_1 \leq 0.05$ 일 경우 식 (2)의 무화유동에 대한 CF 산출
- 4) 기타  $CF_1$  값에 대하여, 식 (2)의 성충유동에 대한 CF 산출
- 5) 단계 3 또는 단계 4에서 산출된 CF를  $CF_2$ 로 설정
- 6) 만약  $|CF_1 - CF_2| \leq \epsilon$ 인 경우 IP는 정확한 값이며, 다른 경우에는 단계 7로 이동
- 7) IP를 변경시키고, 단계 2부터 반복 수행
- 8) 적절한 CF(컨덴세이트 발생량)와 IP(컨덴세이트 발생 시작점)를 산출

## III. 결과 및 고찰

개발된 통계모델의 타당성을 검증하기 위하여 본 연구에서 얻어진 컨덴세이트 발생 시작점을 Boriyantor 등의 결과[4]와 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 6과 Fig. 7은 수평관에서 무화유동과 성충유동의 각각에 대하여 가스 컨덴세이트 발생량에 의한 압력손실 값을 나타내며, 이때 압력손실 값은 입구 압력에 대

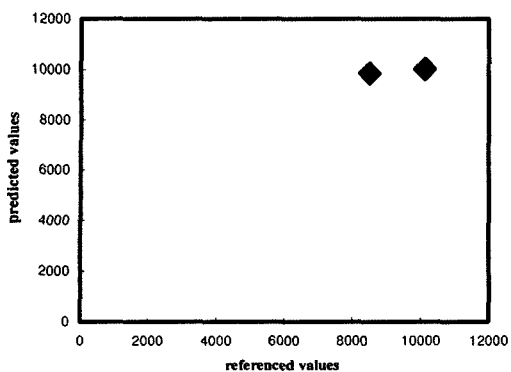


Fig. 5. Comparison of referenced values and predicted values for incipient points.

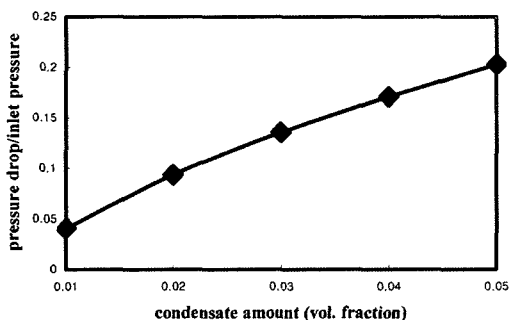


Fig. 6. Pressure drop due to condensate quantity for horizontal flow at mist flow.

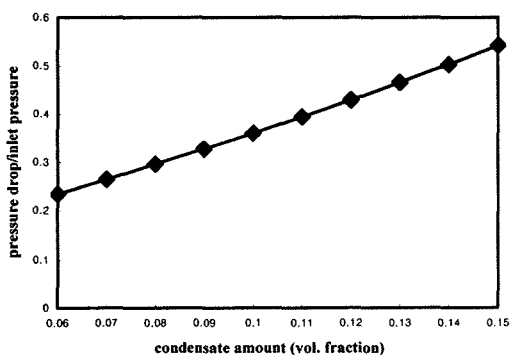


Fig. 7. Pressure drop due to condensate quantity for horizontal flow at stratified flow.

한 압력손실의 비율이다. 이러한 결과로부터 가스 컨덴세이트는 적은 양일지라도 압력손실에 상당한 영향을 미치며, 성층유동에 대한 압력 손실은 무화유동의 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8은 수평관에서 컨덴세이트 발생 시작점에 따른 압력손실 값을 보여준다. 2상 유동지역에서 유동형태를 고려하였을 때 발생 시작점에 따른 압력손실은 무화유

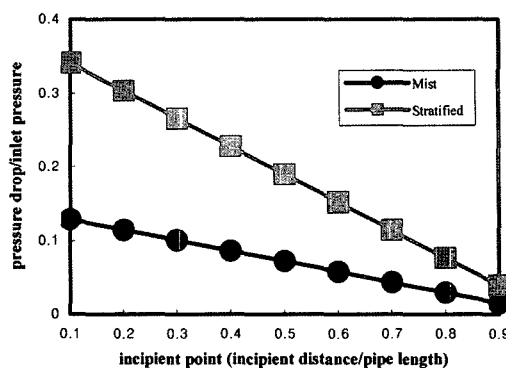


Fig. 8. Pressure drop due to incipient point for horizontal flow.

동의 경우보다 성층유동에서 변화속도가 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구로부터 아래와 같은 결과들을 도출하였다.

- 1) 배관 내의 컨덴세이트 존재는 적은 양일지라도 압력손실에 큰 영향을 미친다.
- 2) 개발된 통계 모델은 출구압력의 관점에서 컨덴세이트 발생 시작점과 발생량을 예측할 수 있었다.
- 3) 2상 유동지역에서 유동형태의 변화는 출구압력에 상당한 영향을 미친다.

#### 사용기호

$a_1, a_2, \dots, a_{10}$  = coefficients

$b_1, b_2, \dots, b_9$  = coefficients

CF = condensate amount, vol. frac.

d = pipe inside diameter, inch

IP = incipient point of condensate, ft

L = pipe length, ft

$P_{in}$  = pressure, psia

$Q_g$  = gas flowrate, MSCFD

T = flowing gas temperature, °F

$\alpha$  = inclination angle, degrees

$\gamma_g$  = gas specific gravity

$\Delta p$  = pressure loss, psia

#### 참고문헌

- [1] Kumar, S., *Gas Production Engineering*, Gulf Publishing Co., (1987)

- [2] Brown, K.E. and Beggs, H.D., *The Technology of Artificial Lift Methods*, Vol. 1, PennWell Books, (1977)
- [3] Beggs, H.D., *Production Optimization Using NODAL Analysis*, Oil & Gas Consultants International, Inc., (1991)
- [4] Boriyantoro, N.H. and Adewumi, M.A., "An Integrated Single-Phase/Two-Phase Hydrodynamic Model for Predicting the Fluid Flow Behavior of Gas Condensate in Pipelines", PSIG 26<sup>th</sup> Annual Meeting, San Diego, CA, (Oct. 1994)
- [5] Adewumi, M.A. and Mucharam, L., "Compositional Multiphase Hydrodynamic Modeling of Gas/Gas Condensate Flow in Gas Pipelines", SPE 17056, SPE Eastern Regional Meeting, Pittsburg, PA, (Oct. 1987)
- [6] Vincent, P.A. and Adewumi, M.A., "Engineering Design of Gas-Condensate Pipelines with a Compositional Hydrodynamic Model", *SPE Production Engineering J.*, (Nov. 1990)
- [7] StatSoft, *Electronic Statistics Textbook*, Tulsa, OK, StatSoft, Inc., (1999)
- [8] Milton, J.S. and Arnold, J.C., *Introduction to Probability and Statistics: Principles and Applications for Engineering and the Computing Sciences*, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill, Inc., (1990)