

천연가스 파이프라인에서 다성분-다상 유체의 천이유동분석

성원모*, 권오관*, 박용찬*, 허대기**

한양대 지구환경건설공학부*, 한국자원연구소 석유해저자원연구부**

1. 서론

파이프라인내 천연가스 단상유동에 관한 연구는 일차원 유동모델을 비롯하여 배관망의 비정상 유동모델¹⁾과 배관망 최적설계 문제²⁾에 이르기까지 상당히 진보되어 있으나 다상유동에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 수평관 및 경사관에서 다성분 탄화수소 혼합물의 다상유동을 묘사하기 위하여 비정상상태 2상 유체유동모델을 개발하는데 역점을 두었다.

2상 유동 파이프라인에서 가스, 액체 등에 대한 천이현상은 관출구에서의 유량 변화, 관입구에서의 압력변화, 밸브개폐, 관파손 및 피강시에 나타나며, 이때 수반되는 압력파동 및 액체누적 현상들은 정상적인 유체유동을 방해하는 요인이 된다.

일반적으로 기-액 2상 유동시스템을 해석하는 방법은 크게 경험식모델(Empirical Correlation)과 유동역학모델(Hydrodynamic Model)로 구분된다. 경험식모델은 2상 유체를 하나의 혼합물로 가정하고, 관내 유동패턴, 액체점유율, 압력강하와 같은 특성들을 혼합물 상관식에 의존하여 독립적으로 계산한다.³⁾ 이 모델들은 물리적-열역학적 특성들을 적절하게 묘사할 수 없는 단점을 가지고 있다. 한편, Navier-Stokes식을 근간으로 한 유동역학모델은 2상 유체들의 특성에 따라 균질모델(Homogeneous Model), 간소화된 역학모델(Simplified Mechanistic Model), 드리프트 유동모델(Drift Flux Model), 2상 유체유동모델(Two-Fluid Model)로 분류된다. 2상 천이유동을 묘사하기 위해, Scoggins⁴⁾는 상간의 미끄럼 효과가 균질하다는 조건하에 경험식으로 액체점유율을 결정하는 균질모델을 이용하였다. Minami⁵⁾는 가스연속방정식이 준정상상태이고 모멘텀방정식은 국부적으로 평행하다는 가정하에 Navier-Stokes식을 간소화시킨 Taitel⁶⁾의 간소화된 역학모델을 개선시켜 semi-implicit법으로 2상 천이현상을 규명하였다. 결과적으로 이 방법은 액체가 비압축성이고 상간의 질량교환이 없으며, 또한 2상 천이현상이 매우 느리게 진행되는 다상유동관에만 적용할 수 있다. Pauchon⁷⁾은 상간의 질량교환이 무시된 드리프트 유동모델을 근간으로 2상 천이유동 시뮬레이터 TACITE를 개발하여, 이 모델을 공기-케로신 혼합물이 유동하는 단거리 수평순환망에서의 천이유동 실험자료에 적용하여 그 타당성을 explicit법으로 검증하였다. Bendiksen⁸⁾은 기존의 2상 유체유동모델에 액체방울에 대한 연속방정식과 모멘텀방정식을 추가하여 보다 정확한 2상 유동을 묘사하고자 개발한 OLGA 코드의 타당성을 그들의 실험실에서 얻은 자료로 검증하였다. 또한 이들은 OLGA 코드의 현장 적응성을 시험하기 위하여, 육상유전으로부터 생산된 중질유를 수송하는 파이프라인 시스템에 OLGA 코드를 적용하였다. Adewumi⁹⁾는 2상 유체유동모델을 근간으로하여 개발한 정상상태모델을 장거리 수평관에 적용하여 컨덴세이트 혼합물의 역응축현상을 묘사하였다.

본 연구에서는 천연가스 수평관 및 경사관에서 다성분 탄화수소 혼합물의 2상

유동을 묘사하기 위하여 비정상상태 가스-컨덴세이트 2상 유체유동모델 HYPIP (HanYang Pipeline)을 개발하였다. 또한 다상유동을 묘사하는 비선형식들을 fully implicit 형태로 차분화하여 모델의 수치적 안정성을 도모하였다. 한편 개발된 모델을 현장규모의 장거리 파이프라인에 적용하여 다상유동의 천이현상을 규명하였다. 여기서 사용된 유체는 수송관에서 압력과 온도의 변화에 따라 액화 및 기화현상이 연속적으로 발생하는 탄화수소 가스-컨덴세이트 혼합물로서, 이들의 복잡한 열역학적 거동을 보다 효율적으로 묘사하기 위해 본 연구에서는 개선된 PR 상태방정식¹⁰⁾을 이용하여 가스와 액체사이의 질량교환현상을 가능케 하였고, 이에 의해 혼합물 조성에 의존하는 열역학적-물리적 특성들을 도출하여 파이프라인 모델에 적용하였다.

2. 이론 및 모델

파이프라인에서 액화 및 기화현상을 고려한 2상 유체유동모델과 상평형모델이 결합된 비정상상태 2상 유동 파이프라인 모델의 개발을 위해, 개선된 PR 상태방정식과 질량 및 모멘텀 보전법칙이 적용되었다.

Fig. 1에 제시된 바와 같이 가스와 컨덴세이트 혼합물이 각각 연속상으로 존재하고, 이들의 속도가 서로 다른 분산유동에서, 유체의 역액화나 기화현상의 결과로 시스템에서 발생하는 질량의 생성 및 소멸을 고려한다면 가스 및 액체의 연속방정식은 각각 시간(t)과 거리(x)에 대해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_k \alpha_k v_k) = \dot{M}_k \quad (1)$$

여기서 하첨자 k 는 가스와 액체의 상을 나타내며, \dot{M}_k 는 질량교환율, v_k 는 속도, α_k 는 점유율, ρ_k 는 밀도를 의미한다. 한편, 가스-액체간의 항력(F_{dk}), 유체-관벽간의 마찰력(F_{wk}), 질량교환력(F_{mk}), 중력(F_{gk})을 고려한 가스와 액체에 대한 모멘텀방정식은 다음과 같은 미분방정식 형태로 전개된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k \alpha_k v_k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_k \alpha_k v_k^2) = -\alpha_k \frac{\partial P}{\partial x} - F_{dk} - F_{wk} - F_{mk} - F_{gk} \quad (2)$$

가스-액체 2상 유동을 묘사하는 편미분방정식에는 17 개의 미지수가 존재하므로 시스템을 만족하기 위해서는, 식 (1)과 (2)외에 13 개의 추가식이 필요하다. 이중 4 개의 식은 제한조건식으로서 다음과 같다.

$$\sum_k F_{mk} = 0 : \sum_k F_{dk} = 0 : \sum_k \dot{M}_k = 0 : \sum_k \alpha_k = 1 \quad (3)$$

식 (1)과 (2)의 충분조건을 만족하는 나머지 9개의 식은 구성방정식으로서, 이는 2상 파이프라인에서 발생하는 다양한 유동패턴을 보다 정확히 묘사하기 위해

물리적-열역학적인 관점에서 정의된다. 일반적으로, 천연가스 수송관에서 가스는 고속으로 수송되고 이때 생성되는 컨덴세이트 응축물의 양이 가스량에 비해 소량이기 때문에 본 연구에서는 파이프라인에서의 유동패턴을 분산유동으로 설정하였다. 따라서 상간의 질량교환이 고려되고 각 상에 대한 분산유동의 구성방정식은 마찰력 모멘텀, 항력 모멘텀, 질량교환 모멘텀, 증력 모멘텀으로 구성된다.¹¹⁾ 한편, 상간의 질량교환을 묘사하기 위해서는 상거동모델이 사용되는데 본 연구에서 설정한 2상 파이프라인 시스템은 역응축 영역에 존재하는 탄화수소 유체가 대상이므로 응축된 액상의 밀도를 보다 정확하게 예측할 수 있는 개선된 PR(Modified Peng-Robinson) 상태방정식을 사용하였다. 또한 상거동모델을 활용하여 유체의 밀도, 점성도, 압축인자, 계면장력, 질량교환율 등을 산출하였다.

본 모델에서는 관 입구에서의 경계조건을 압력과 가스점유율로 설정하였고, 가스와 액체속도는 각각 모멘텀방정식으로부터 계산하였다. 한편 관 출구에서는 가스속도가 설정되었고, 압력과 가스점유율은 연속방정식으로부터 계산된다. 상기 언급된 식 (1)과 (2)의 미분방정식은 수렴의 안정성을 위해 fully implicit 방법으로 차별화하여 모델의 안정성을 도모하였다. 이 모델의 흐름도를 도시하면 Fig. 2와 같으며 이 흐름도에서 나타난 입·출력 변수들은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

3. 결과 및 분석

본 연구에서는 개발된 모델 HYPIP을 활용하여 파이프라인의 직경, 길이 등의 크기가 유동특성에 미치는 영향을 조사하였으며 시간에 따라 다양하게 변하는 가스소비량으로 인해 관내에서 발생하는 2상 유동의 천이현상을 분석하였다.

이 연구에서 사용한 유체는 이산화탄소와 질소를 포함한 총 19 가지의 탄화수소 성분들로 구성된 천연가스 혼합물로서 탄화수소 성분중 헵탄보다 무거운 성분들은 C_{7+} 의사성분으로 대표하였으며 이 구성성분들의 조성 및 임계특성은 Table 2에 제시된 바와 같다.⁹⁾ 파이프 전구간에서의 온도는 580 °R로서 등온상태로 설정하였고, 유동패턴은 극소량의 액체가 가스와 함께 관입구로 유입되어 연속상인 가스에 방울 형태의 작은 액체가 분산되어 함께 유동되는 분산유동 패턴으로 가정하였다(Fig. 1 참조).

먼저 개발된 모델의 타당성 검증을 위해, 관입구 압력 1700 psia, 관길이 100 mile, 관직경 2.23 ft인 수평관에 Table 2에서 제시된 혼합물 조성을 갖는 유체가 관 입구의 가스속도와 액체점유율이 각각 20 ft/s와 0.01로 공급되는 시스템을 설정하였다. 이 시스템에 대해 산출된 본 모델의 정상상태 압력분포와 Adewumi⁹⁾가 제시한 정상상태 모델의 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 이 그림을 살펴보면, 약 8%의 오차를 볼 수 있는데, 이는 기본적으로 입력자료의 차이와 의사성분 재구성시 발생하는 상거동 결과의 차이에 있는 것으로 판단된다.

수평관에서 관 직경이 관내 천이압력분포에 미치는 영향을 분석하고자, 전장 100 mile의 가스수송관에 직경이 1.5, 2.23 및 3.0 ft인 경우에 대해 각각 비교·분석하였다. 여기서 관 입구에서의 압력과 액체점유율은 각각 1700 psia와 0.05로 일정하며, 관 입구의 가스 및 액체속도를 10 ft/s와 9.5 ft/s로 각각 설정하였다. 이들에 대한 전산실험에서 유동개시후 정상(평균)상태에 도달하였을 때의 압력분포를 Fig. 4에 나타내었다. 이 결과에서는 직경이 가장 큰 3.0 ft의 경우 예상대로

관의 전구간에서 가장 높은 압력을 보였는데, 이는 대형관에서 유체가 저속으로 유동하기 때문에 마찰력에 의한 압력구배가 소형관에서보다 작다는 사실에 기인한다.

이번에는 가스 소비지에서 수요량이 변화하는 경우 수평관의 길이에 따른 관내에서의 압력후퇴현상 및 파동현상을 분석하였다. 이를 위해 관 입구에서의 압력과 액체점유율은 앞의 경우와 같으며, 가스 및 액체속도는 각각 25 ft/s와 24.5 ft/s이고, 관 직경은 2.23 ft, 관의 전장은 장거리의 경우 520,800 mile로 단거리의 경우 5000 ft로 설정하였다. 이와 같은 시스템에 대해 정상상태모델로 부터 산출된 결과를 초기값으로 하여 비정상 유동모델을 실행하였다. 우선 정상상태모델을 통해 산출한 장거리 수평관의 관 출구 가스속도는 47.03 ft/s이고 단거리 수평관의 경우는 25.07 ft/s로서, 이들은 비정상상태 모델에 경계조건으로 적용되었다. 그 결과 유동개시후 20 분이 경과한 시점에서 정상상태에 도달하였다. 이 시점을 기해 관 출구의 가스속도를 15 ft/s로 재설정하므로써 소비지에서 수요량의 변화에 따른 압력분포를 분석하였다. 이 전산실험의 결과로서 수평관 전 구간에 걸쳐 분포하는 압력을 시간대에 따라 Fig. 5와 6에 도시하였다. 장거리 수평관의 압력분포를 도시한 Fig. 5에서는 각 시간대에 따라 압력후퇴 및 파동현상이 거의 발생하지 않았으나, 단거리 수평관의 압력분포를 도시한 Fig. 6에서는 유동개시 20분이 지난 후 가스속도가 감속되므로써 관내 압력이 급상승하여 시간이 경과함에 따라 그 여파가 관 입구 방향으로 전파됨을 확인할 수 있다. 이 분석을 통해 단거리 관일수록 극심하게 발생하는 압력후퇴현상에 의해 수송관에 무리를 야기시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

이번에는 가스 소비지에서의 수요량의 변화가 수평관내 비정상상태 천이압력 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 관의 전장과 직경이 100 mile과 2.23 ft인 수평관에서, 관 입구에서의 압력과 액체점유율을 1700 psia와 0.01로 모두 동일하게 하고, 다만 관 입구에서의 가스속도를 15, 20, 25, 30 ft/s로 각각 다르게 설정하였다. 정상상태모델에 의해 산출된 관 출구에서의 가스속도는 각각 15.8, 26.0, 41.1, 87.9 ft/s이다. 이들 각 경우에 대해 유동개시 120 초 후에는 관 출구에서의 가스속도를 10 ft/s로 감속하여 설정하였다. 이러한 조건하에서 수행된 결과로, 시간에 따른 관 출구 압력과 관 입구 가스속도의 변화를 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 관 입구에서의 초기 가스속도가 가장 느린 15 ft/s인 경우, 관 출구의 압력이 1510에서 1571 psia로 약 61 psia 증가한데 비해, 가장 빠른 30 ft/s로 설정한 경우의 압력은 669 psia에서 1571 psia로 무려 902 psia나 증가됨을 볼 수 있었다. 이 결과로부터 수요처에서 가스 소비량의 변동이 클수록 압력 변동도 크게 발생하여 수송관에 무리를 야기시킬 수 있음을 확인하였다. Fig. 7(b)의 그림에서는 관 입구의 초기 가스속도가 가장 느린 15 ft/s인 경우 총 2 시간이 경과한 시점부터 관 입구의 가스속도가 정상상태에 도달한 반면, 관 입구의 초기 가스속도가 가장 빠른 30 ft/s의 경우에는 총 3.5 시간으로서 더 오랜 시간이 경과한 후에 관 입구 가스속도가 정상상태에 도달하였다. 이번에는 관 입구에 설정된 초기 가스속도가 수평관 전 구간에서의 액체점유율에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 우선 관 입구의 초기 가스속도가 가장 느린 15 ft/s인 경우 관 출구에서의 액체점유율이 0.0088로 입구에서의 액체점유율 0.01과 큰 차이를 보이지 않았으나, 관 입구의 가스속도가 가장 빠른 30

ft/s인 경우, 관 출구에서의 액체점유율이 0.0031로 입구에서의 액체점유율과 큰 차이를 보이고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상의 원인은 Fig. 7(a)에서 보듯이 관 입구에서의 초기 가스속도가 빠를수록 관 출구에서의 압력이 보다 떨어지고, 이로 인해 관 출구에서의 가스부피는 보다 크게 팽창하기 때문에 액체부피가 상대적으로 감소하는데 그 원인이 있다.

다음은 역응축현상이 발생하는 수평관에서 압력분포에 따라 질량속도가 최대가 되는 지점을 예측하였다(Fig. 9 참조). 앞에서 설정한 시스템에서, 관 입구의 가스속도가 가장 큰 30 ft/s의 경우 관 입구로부터 30 mile 지점에서 관내 압력이 1478 psia이고, 이 압력에서 상거동모델에 의해 도출된 액체의 몰비는 1.64 %로 관내 최대값을 나타낸 반면, 관 입구로부터 62 mile 지점에서 관내 압력이 1189 psia로서, 이 압력에서 상거동모델을 결합한 유동역학모델에 의해 계산된 액체의 질량속도는 52.91 lbm/s로 최대값을 나타내었다. 이와 같이 상거동 결과와 파이프라인 유동 결과의 불일치는 열역학과 유동역학의 복합요인에 따라 결정되는 질량교환율에 그 원인이 있다. 따라서 이 시스템에 액체 제거장치 설치시 액체의 질량속도가 최대가 되는 62 mile 지점에 그 위치를 결정하는 것이 다상유동관 운영의 최적이 됨을 확인할 수 있었다.

현장에서 장거리 수송관의 대부분은 경사관으로 모델의 실질화를 위해 관 시스템의 고도를 부분적으로 다르게 설정하여 중력효과가 2상 유동에 미치는 영향을 분석하였다. 여기서 경사관은 전장 5000 ft의 관으로 입구로부터 1000 ft에서 2000 ft까지는 10° 상향관으로 2000 ft에서 3000 ft까지는 수평관으로 3000 ft에서 4000 ft까지는 10° 하향관으로 하고 나머지 구간은 수평관으로 설정하였다(Fig. 10 참조). 이 시스템에서 전 구간의 직경을 2.23 ft, 관 입구의 압력, 가스속도, 액체점유율을 각각 1700 psia, 20 ft/s, 0.05로 설정하였다. Fig. 10을 살펴보면 우선 가스속도는 관 경사에 큰 영향을 받지 않으나, 액체속도는 관 입구로부터 1000 ft에서 2000 ft까지의 상향관에서는 중력의 효과로 인해 감속되는 반면, 관 입구로부터 3000 ft에서 4000 ft까지의 하향관에서는 크게 가속되는 양상을 볼 수 있다. 한편, 액체점유율은 상향관에서 다소 증가하고 하향관에서 급격히 감소하는 경향을 보이며 이는 액체속도와 전반적으로 대칭임을 볼 수 있다. 따라서 경사관에서의 액체점유율은 액체속도와 서로 민감하게 작용함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 천연가스 수송관에서 다성분 혼합물의 2상 유동현상을 예측하고 역액화현상을 묘사할 수 있도록 연속방정식과 모멘텀방정식으로 구성된 유동역학모델에 개선된 PR 상태방정식을 적용하여 가스 또는 가스-컨덴세이트 비정상상태 유동 파이프라인 모델 HYP/IP를 개발하였고, 이 모델을 활용하여 파이프라인에서의 유동분석을 수행한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 가스 컨덴세이트 수송관에서의 최적운용 시스템을 설계하기 위해 개발된 HYP/IP 모델의 타당성 검증을 목적으로 다양한 직경 및 길이의 수평관에 적용한 결과, 관직경이 소형관일수록 보다 큰 폭의 압력강하가 발생하며, 관길이 단거리일수록 압력후퇴 및 파동현상이 극심하게 발생함을 확인하였다.
- 2) 소비자에서 가스 수요량의 변화가 가스수송관에 미치는 영향을 분석한 결과,

- 가스수요량의 변화폭이 커짐에 따라 관 출구에서 압력이 보다 큰 쪽으로 상승하며 관 입구에서 가스속도가 보다 늦게 정상상태에 도달함을 알 수 있었다.
- 3) 마지막으로, 경사관에서의 2상 유동을 분석한 결과, 상향관에서는 액체속도가 느려지는 반면 액체점유율은 증가하고, 하향관에서는 이와 반대되는 결과로 인해 경사관에서 액체속도와 액체점유율이 서로 민감하게 작용함을 확인하였다. 한편 가스속도는 액체속도에 비해 파이프라인의 경사에 비교적 영향을 받지 않음을 확인하였다.

5. 참고 문헌

1. 박원준, 이정환, 유인항, 성원모: 한국자원공학회지, 33, 1, 1-10 (1996).
2. Sung, W., Lee, J., Huh, D. and Kwon, O.: Paper SPE 38101 presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, April 1997: Kuala Lumpur.
3. Govier, G. W. and Aziz, K.: "The Flow of Complex Mixtures in Pipes" Van Nostrand Reinhold, New York(1972).
4. Scoggins, M. W. Jr.: Ph.D Dissertation, University of Tulsa, Tulsa, OK(1977).
5. Minami, K.: Ph.D Dissertation, University of Tulsa, Tulsa, OK(1991).
6. Taitel, Y., Shoham, O. and Brill, J. P.: Chem. Eng. Sci., 44, 1353-1359(1989).
7. Pauchon, C. L., Dhulesia, H., Cirlot, G. B. and Fabre, J.: Paper SPE 28545 presented at the SPE Annual Meeting, Sep. 1994: Dallas, 311-326(1994).
8. Bendiksen, K. H., Malnes, D., Moe, R. and Nuland, S.: SPEPE, 171-180(1991).
9. Adewumi, M. A. and Mucharam, L.: SPEPE, 85-90(1990).
10. 권오광, 성원모: 한국자원공학회지, 31, 6, 493-501(1994).
11. Huhges, E. D., Lyczkowski, R. W., McFadden, J. H. and Niederauer, G. F.: EPRI, NP-143, v. 2(1976).

Table 1. Input and output variables of the model HYPIP.

| Input | Output |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Inlet pressure ▪ Inlet temperature ▪ Inlet gas and liquid flow rates ▪ Pipe segment length, diameter, elevation, roughness ▪ Fluid overall composition ▪ Initial liquid holdup ▪ Maximum simulation time ▪ Time of gas velocity change at outlet | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fluid pressure ▪ Gas void fraction ▪ Liquid holdup ▪ Gas and liquid velocities ▪ Gas and liquid mass velocities ▪ Gas and liquid mass flow rates ▪ Gas and liquid fluid properties ▪ Gas and liquid volumetric flow rates |

Table 2. Natural gas composition and physical properties.

| Component | Overall Composition Z_i | Critical Temperature T_{ci} , °R | Critical Pressure P_{ci} , psia | Molecular Weight M_{wi} | Acentric Factor ω_i | Critical Volume V_{ci} , ft ³ /lb _m |
|------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------|---|
| CO ₂ | 0.0032 | 584.16 | 1071.00 | 44.010 | 0.2250 | 0.0344 |
| N ₂ | 0.0101 | 195.76 | 493.00 | 28.013 | 0.0400 | 0.0510 |
| C ₁ | 0.7557 | 343.37 | 667.80 | 16.043 | 0.0104 | 0.0988 |
| C ₂ | 0.1122 | 550.09 | 707.80 | 30.070 | 0.0986 | 0.0783 |
| C ₃ | 0.0778 | 666.01 | 616.30 | 44.097 | 0.1524 | 0.0727 |
| i-C ₄ | 0.0078 | 734.98 | 529.10 | 58.124 | 0.1848 | 0.0714 |
| n-C ₄ | 0.0171 | 765.65 | 550.70 | 58.124 | 0.2010 | 0.0703 |
| i-C ₅ | 0.0028 | 829.10 | 490.40 | 72.151 | 0.2223 | 0.0679 |
| n-C ₅ | 0.0031 | 845.70 | 488.60 | 72.151 | 0.2539 | 0.0675 |
| n-C ₆ | 0.0041 | 868.00 | 419.00 | 76.200 | 0.2600 | 0.0688 |
| C ₇₊ | 0.0061 | 1163.77 | 403.12 | 121.860 | 0.2869 | 0.0548 |

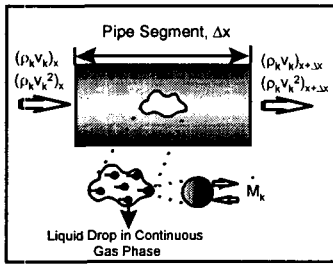


Fig. 1. One-dimensional cylindrical element with length of Δx .

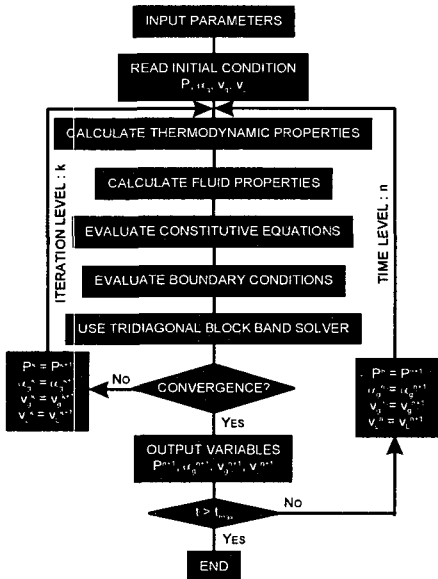


Fig. 2. The flow diagram of the compositional two-fluid transient model (HYPIP).

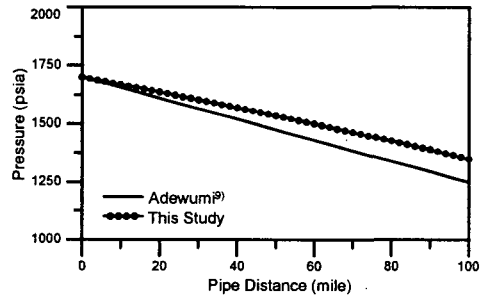


Fig. 3. Comparison of steady state pressure distribution for the validation of the HYPIP model.

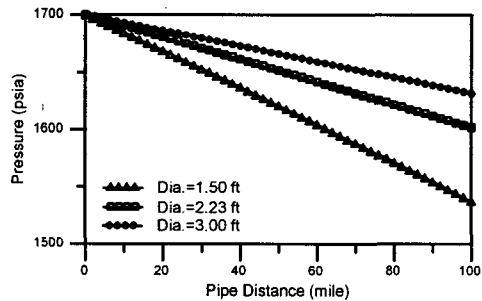


Fig. 4. Steady state pressure distributions for various sizes of pipe diameter.

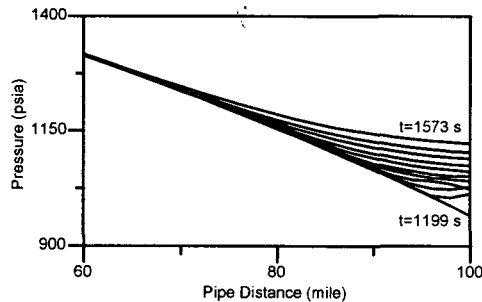


Fig. 5. Pressure buildup caused by back pressure along the long distance pipeline system.

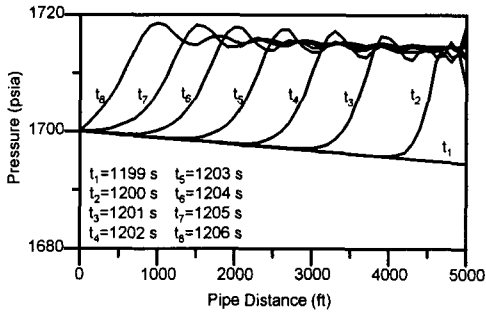


Fig. 6. Pressure buildup caused by back pressure along the short distance pipeline system.

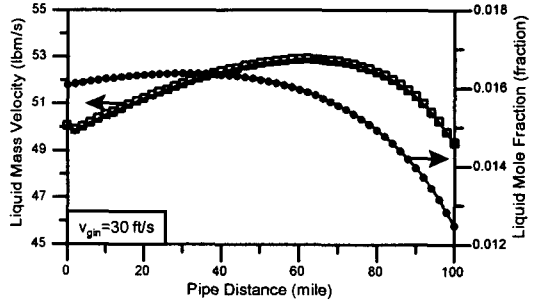


Fig. 9. Liquid mass velocity and mole fraction profiles along the pipeline.

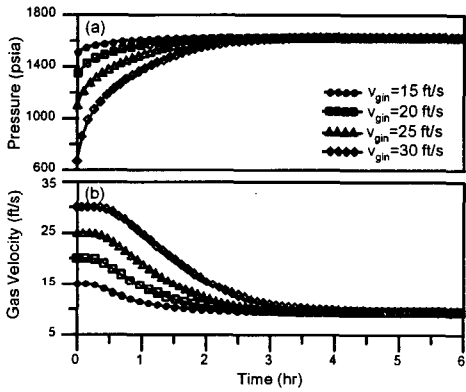


Fig. 7. Comparisons of pressure buildup at the outlet, and gas velocity at the inlet.

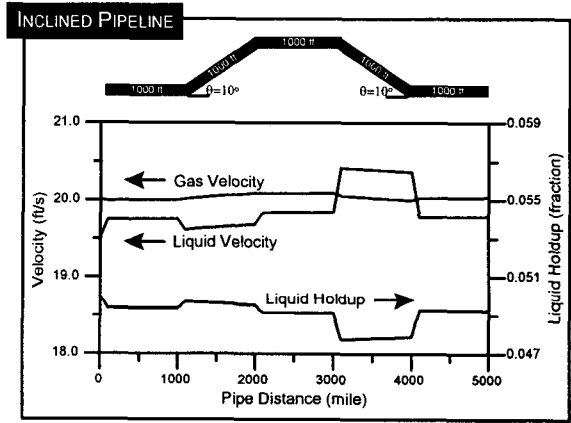


Fig. 10. The velocities and liquid holdup profiles in inclined pipeline system.

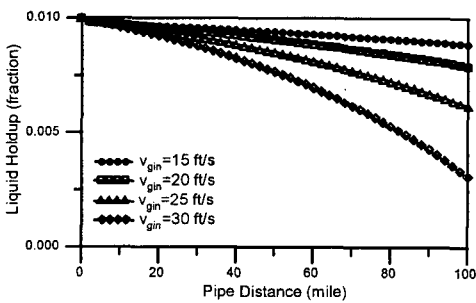


Fig. 8. Liquid holdups for various values of gas velocity.