



가스 파이프라인 내의 누출 현상이 출구 압력에 미치는 영향에 대한 연구

†장 승 용

(주)카프나

(2006년 8월 8일 접수, 2006년 9월 17일 채택)

Leakage Effect on the Exit Pressure in a Gas Pipeline

†Seungyong Chang

KAPNA Corp.

(Received 8 August 2006, Accepted 17 September 2006)

요 약

본 논문에서는 가스 파이프라인 내의 누출 현상이 파이프라인 출구 압력 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 경사진 지형적 영향을 고려하기 위하여, 보정된 Weymouth 식이 본 연구에서 사용되었다. 누출 영향을 분석하기 위하여, 수평관, 상향 및 하향 경사관 각각에서 누출 현상이 없을 경우와 누출 현상이 발생할 경우에 대하여 출구 압력과 입구 압력에 대한 출구 압력 비율을 비교하였다. 그 후, 누출 위치가 출구 압력에 미치는 영향에 대하여도 모든 파이프라인 경사각에 대하여 분석하였다.

Abstract—This paper investigates leak effect on the outlet pressure at pipeline exit. A modified Weymouth equation(including inclination effect) was used for this study. To investigate leak effect, outlet pressure and ratio of outlet to inlet pressure were compared between no leak and leak conditions for horizontal, upward and downward flows, respectively. Then, effects of leak location as well as leak rate on the outlet pressure were also investigated for all pipeline inclinations.

Key words : Leak effect, Weymouth equation, Leak location, Leak rate

I. 서 론

가스 산업에서, 안전하고 효율적인 배관 시스템의 조업은 매우 중요한 요소이다. 이러한 조업을 수행하기 위하여, 파이프라인 무결성 여부를 감시하는 시스템이 자주 활용된다[1].

- 1) 부식 감시 (Corrosion Monitoring)
- 2) 파손 감지 (Damage Detection)
- 3) 누출 감지 (Leak Detection)

상기와 같이, 누출 감지는 파이프라인 무결성 감시 시스템(Pipeline Integrity Monitoring System) 가운데 하나이다. GRI 보고서에 의하면, 본관과 서비스 배관의 800,000 케이스의 누출 사고가 연간 발생하고 있으며, 보수 비용도 4억 5천만 불 이상이 소요된다[2].

누출은 파이프라인을 흐르는 유체의 원치 않는 방출

현상으로 정의된다. 그러므로, 가스 파이프라인 조업에 누출 현상이 미치는 영향을 사전에 이해하는 것은 가스 산업 현장에 매우 중요한 요소이며, 특히 대규모 관경을 가진 장거리의 해저 파이프라인 내의 누출 감지는 매우 중요한 관심사이다.

누출 감지 기술에 대한 많은 연구가 현재까지 수행되었으며, 그 연구 가운데 하나로써, Turner는 파이프라인 누출 감지 모니터링에 대한 몇 가지 기술들을 검토하였다[1].

본 연구에서는, 누출 현상이 출구 압력에 미치는 영향을 분석하는 방법을 제시하였고 제시한 방법에 의하여 산출된 결과들을 분석하였다.

위에서 언급한 바와 같이, 누출 감지에 대한 다양한 기술들이 개발되었고 가스 산업 현장에서 사용되고 있지만 대부분의 기술들은 다수의 감지 장비와 절차들을 필요로 한다. 이러한 현실은 기술 적용 시 상당한 불편함과 비용을 요구한다.

*주저자:csydr@hanmail.net

반면, 파이프라인 출구에서의 압력 변화량을 이용한 누출 감지는 파이프라인 출구 압력의 모니터링만을 필요로 하므로 만약 SCADA 시스템이 현장에서 측정되는 압력 값들을 적절한 주기로 판독할 수만 있다면 본 기술을 사용하기 위하여 표준의 압력 센서만이 필요하다. Weymouth 식은 고압의 수평 가스 배관 시스템에 자주 사용한다.

그러나 본 연구에서는, 지형적인 영향을 고려하기 위하여 경사각을 포함한 보정된 Weymouth 식을 이용하였다. 누출 영향을 분석하기 위하여, 수평관, 상향 및 하향 경사관 각각에서 누출 현상이 없을 경우와 누출 현상이 발생할 경우에 대하여 출구 압력과 입구 압력에 대한 출구 압력 비율을 비교하였다.

마지막으로, 누출 위치가 출구 압력에 미치는 영향에 대하여도 모든 파이프라인 경사각에 대하여 분석하였다.

II. 보정된 Weymouth 방정식

가스 유동에 대한 잘 알려진 Weymouth 방정식은 다음과 같다[3].

$$q_{sc} = 433.50E \left(\frac{T_b}{p_b} \right) \left[\frac{P_1^2 - P_2^2}{\bar{T}\bar{Z}L} \right]^{0.5} \left(\frac{1}{\gamma_g} \right)^{0.5} d^{2.667} \quad (1)$$

여기서,

q_{sc} : 표준 조건인 T_b, p_b 에서 측정된 유량, cu ft/day

E : 배관 효율

T_b : 520°R

p_b : 14.7 psia

T : °R

P : psia

L : miles

d : inches

그러나 방정식 (1)은 수평관에서 유도되었으므로, 경사진 유동 조건에서는 사용할 수 없다. 따라서, 방정식 (1)은 지형적인 영향을 고려하기 위하여 변경되어야 한다.

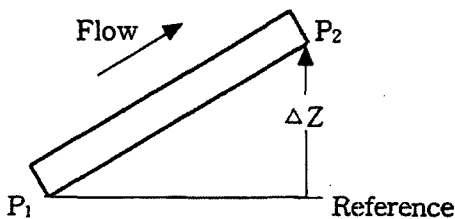


Fig. 1. A schematic diagram of flowline.

Fig. 1과 같이 지표에 놓여 있는 유동관을 고려해 보자.

배관의 입구 지점과 출구 지점의 고도차(ΔZ)를 고려하기 위한 하나의 접근 방법은 출구 압력을 변경시키는 것이며 p_1 을 입구 압력이라 하고 p_2 를 출구 압력이라 가정할 때, 출구 압력인 p_2 는 다음과 같이 보정될 수 있다[4].

$$p_2 = e^{s/2} p_1 \quad (2)$$

여기서,

$$s = \frac{(0.0375 \gamma_g \Delta Z)}{(\bar{Z}\bar{T})}$$

만약 출구가 입구보다 높은 상향 유동의 경우 ΔZ 는 양의 값이고 입구가 출구보다 높은 하향 유동의 경우는 음의 값이 된다. 그러므로, S 는 상향 유동에 대하여 양의 값이며 하향 유동에 대하여 음의 값을 갖는다.

Fig. 1로부터, 유동관은 인입 압력이 p_1 이고 출구 압력이 $e^{s/2} p_1$ 인 수평관과 동일하다. 이러한 보정 방법은 경사진 유동관 내의 유동을 설명하기 위하여 어떠한 수평 유동식과도 함께 사용될 수 있다.

이러한 조건에 대한 Weymouth 식은 다음과 같다.

$$q_{sc} = 433.50E \left(\frac{T_b}{p_b} \right) \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{\bar{T}\bar{Z}L} \right]^{0.5} \left(\frac{1}{\gamma_g} \right)^{0.5} d^{2.667} \quad (3)$$

이 식은 경사진 유동 조건에 적용하기 위하여 보정된 Weymouth 식이다[4].

방정식 (3)을 출구 압력인 p_2 에 대하여 정리하면,

$$p_2 = \left[\frac{p_1^2 - \left\{ q_{sc} \left(\frac{1}{433.50E} \right) \left(\frac{p_b}{T_b} \right) (\gamma_g \bar{T}\bar{Z}L)^{0.5} \left(\frac{1}{d} \right)^{2.667} \right\}^2}{e^s} \right]^{1/2} \quad (4)$$

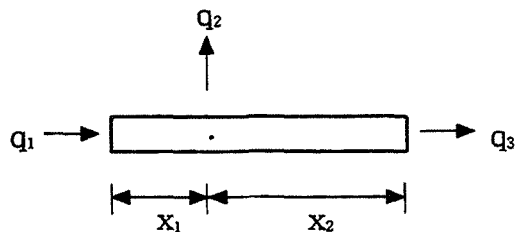


Fig. 2. A flowline for leakage occurrence.

방정식 (4)는 주어진 조건에서 출구 압력 값을 계산하기 위하여 본 연구에서 사용된 식이다.

Fig. 2와 같이 가스 누출이 발생하고 있는 유동관을 고려해 보자.

누출이 q_2 의 량으로 임의의 지점에서 발생한다고 가정하자. 누출이 발생하는 지점에 하나의 노드를 설정하고 그 노드에 대하여 질량 보존의 법칙을 적용하면,

$$\sum w_i = \sum (\rho_i q_i) = 0 \quad (5)$$

위의 식과 같이, 질량 유량은 체적 유량과 밀도를 곱한 양이다. 표준 조건의 경우, 밀도는 모든 질량 유량에 대하여 동일하므로, 방정식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum (\rho_{sc} q_i) = 0 \quad (6)$$

방정식 (6)에서 밀도 항을 제거하면, 질량 유량에 대한 방정식 (5)는 체적 유량으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum (q_i) = 0$$

$$q_1 = q_2 + q_3 \quad (7)$$

Fig. 2와 같이, 유동관은 각각 누출 지점의 상류 부분과 하류 부분으로 나눌 수 있으며 이러한 부분은 Fig. 2에서 각각 X_1 과 X_2 로 나타낸다. 첫 번째로, 상류 부분에서 출구 압력은 거리 X_1 에 대한 유량 q_1 을 이용하여 산출할 수 있다.

누출 지점에서 가스의 일부분인 q_2 는 누출되므로, 누출 하류 부분에서의 가스 유량은 q_3 로 감소되어 하류 부분을 이동한다. 그 후, 누출 상류 부분에서 출구 압력은 누출 하류 부분의 입구 압력으로 사용하고 배관 출구에서 출구 압력은 누출로 인하여 감소된 유량인 q_3 를 이용하여 산출한다.

III. 결과 및 토론

Fig. 3은 측정된 압력 값과 산출된 압력 값을 비교한 것이다.

검증을 위하여 Tian과 Adewumi의 실험 데이터를 사용하였으며[5], 사용 변수들과 산출 값들은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1에서, d_i 는 각 테스트에 대한 % error를 나타내며 여기에서 산출된 결과들은 측정된 값들보다 적은

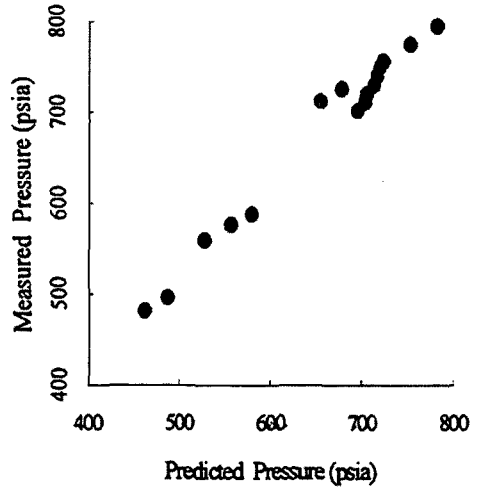


Fig. 3. Measured pressure vs. predicted pressure.

Table 1. Comparison of measured and predicted outlet pressures

Test	T (°F)	P_1 (psia)	$P_{2,measured}$ (psia)	$P_{2,predicted}$ (psia)	d_i (%)
1	64.0	814.8	749.8	721.0	-3.84
2	58.8	797.7	741.0	718.3	-3.07
3	59.7	769.3	730.5	714.5	-2.19
4	58.9	754.5	720.4	706.8	-1.89
5	58.3	729.8	711.2	704.4	-0.96
6	58.3	716.6	701.7	696.6	-0.73
7	63.3	602.7	587.6	579.7	-1.35
8	63.0	612.1	576.3	556.9	-3.36
9	62.5	611.1	559.0	527.7	-5.61
10	62.8	515.5	495.7	486.9	-1.78
11	62.3	518.7	481.0	461.8	-3.99
12	68.0	812.7	795.0	784.0	-1.38
13	70.0	811.3	774.8	754.2	-2.65
14	71.8	809.0	756.5	724.7	-4.20
15	72.0	812.6	725.9	678.6	-6.51
16	72.7	814.0	712.4	655.6	-7.97

Test Condition

$T(^{\circ}F) = 72.7$, $p_1(\text{psia}) = 814.0$, $d(\text{inch}) = 19.4375$, $L(\text{mile}) = 63.07$

Approx. Gas Composition

$C_1 = 76.99$, $C_2 = 5.21$, $C_3 = 2.85$, $i-C_4 = 0.3$, $n-C_4 = 0.67$, $i-C_5 = 0.08$
 $n-C_5 = 0.08$, $C_6 = 0.02$, $C_7 = 0.12$, $N_2 = 13.28$, $CO_2 = 0.3$, $O_2 = 0.1$

값을 보이므로 모든 % error는 음의 값을 보여준다.

Fig. 4-6은 수평관, 상향 및 하향 유동관 각각에서 유

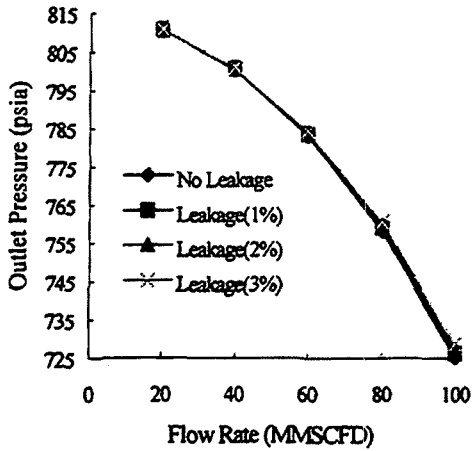


Fig. 4. Comparison of no leakage and leakage conditions for horizontal flow.

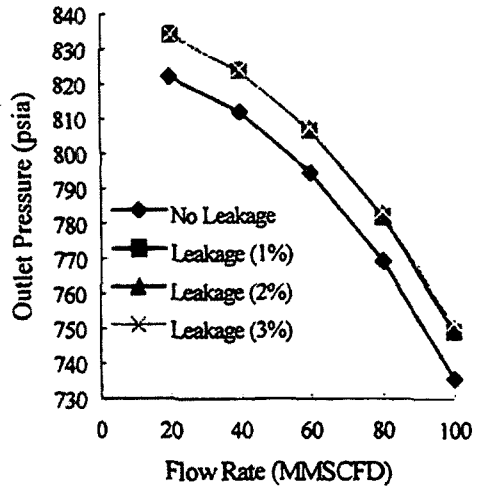


Fig. 6. Comparison of no leakage and leakage conditions for downward flow.

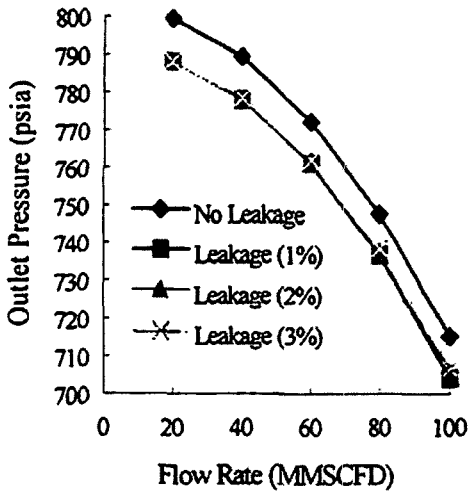


Fig. 5. Comparison of no leakage and leakage conditions for upward flow.

량에 따른 누출이 발생하지 않을 경우와 누출이 발생할 경우에 대한 출구 압력을 비교한 것이다. 여기에 사용된 배관 길이는 63.07 mile이며 누출량은 전체 유량의 1, 2, 3%로 가정하였다.

수평관의 경우, 출구 압력은 누출 여부와 상관없이 거의 동일하므로, 본 연구에 사용한 누출량에 대하여 누출의 영향이 거의 없으나 상향/하향 유동의 경우, 수평 유동에 비하여 누출 영향이 현저해짐을 알 수 있다. 가스 유량의 경우, 유량이 증가할수록 경사각에 무관하게 출구 압력이 감소한다. 입구 압력에 대한 출구 압력 비와 Fig. 4-6의 결과는 Table 2-4에 나타나 있다.

Fig. 7-9는 수평, 상향, 하향 유동 각각에 대하여 누출 지점 및 누출량 변화에 따른 출구 압력 값의 영향을 보여주는데, 수평 유동과 하향 유동의 경우, 배관 입구로부터 멀어질수록 누출량이 감소할수록 출구 압력 값이 감소한다.

Table 2. Comparison of outlet pressure and ratio of outlet to inlet pressure between no leakage and leakage conditions for horizontal flow.

q_{sc} (MMSCFD)	Horizontal Flow							
	p_2 (psia)				Ratio (p_2/p_1)			
	No Leakage	Leakage			No Leakage	Leakage		
		1%	2%	3%		1%	2%	3%
20	810.64	810.68	810.73	810.77	0.99587	0.99592	0.99598	0.99603
40	800.46	800.64	800.82	801.01	0.98337	0.98359	0.98381	0.98404
60	783.21	783.60	784.03	784.44	0.96217	0.96266	0.96318	0.96369
80	758.39	759.08	759.85	760.62	0.93169	0.93253	0.93348	0.93442
100	725.25	726.26	727.53	728.79	0.89097	0.89222	0.89378	0.89532

Table 3. Comparison of outlet pressure and ratio of outlet to inlet pressures between no leakage and leakage conditions for upward flow (h = 518 ft).

q_{sc} (MMSCFD)	Upward Flow							
	p_2 (psia)				Ratio (p_2/p_1)			
	No Leakage	Leakage			No Leakage	Leakage		
		1%	2%	3%		1%	2%	3%
20	799.22	787.96	788.00	788.05	0.98184	0.96801	0.96806	0.96812
40	789.19	778.00	778.18	778.36	0.96952	0.95577	0.95600	0.95622
60	772.18	761.09	761.52	761.94	0.94862	0.93500	0.93552	0.93604
80	747.71	736.74	737.52	738.29	0.91857	0.90509	0.90604	0.90699
100	715.03	704.13	705.40	706.66	0.87842	0.86502	0.86659	0.86814

Table 4. Comparison of outlet pressure and ratio of outlet to inlet pressures between no leakage and leakage conditions for downward flow (h = -518 ft).

q_{sc} (MMSCFD)	Downward Flow							
	p_2 (psia)				Ratio (p_2/p_1)			
	No Leakage	Leakage			No Leakage	Leakage		
		1%	2%	3%		1%	2%	3%
20	822.22	834.10	834.15	834.19	1.01010	1.02469	1.02475	1.02480
40	811.90	823.97	824.16	824.34	0.99742	1.01225	1.01248	1.01270
60	794.40	806.80	807.22	807.64	0.97592	0.99115	0.99167	0.99218
80	769.23	782.09	782.86	783.63	0.94500	0.96080	0.96175	0.96269
100	735.61	749.07	750.33	751.58	0.90369	0.92023	0.92178	0.92331

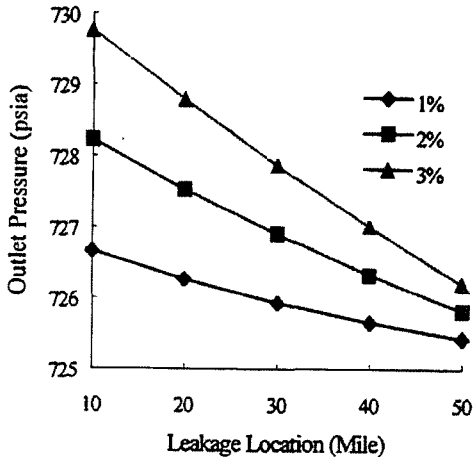


Fig. 7. Comparison of outlet pressures for leakage variations for horizontal flow.

그러나, 하향 유동의 경우가 수평 유동에 비하여 출구 압력 값의 변화량이 훨씬 크며 상향 유동의 경우, 누출량이 3%인 경우, 출구 압력 변화량은 수평, 하향 유동과 유사한 추세를 보이지만 변화량은 완만함을 알 수 있다.

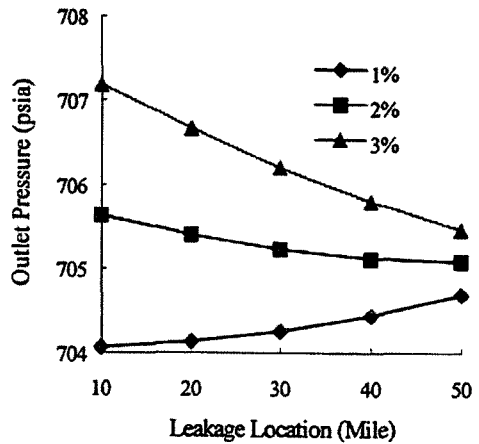


Fig. 8. Comparison of outlet pressures for leakage variations for upward flow.

그러나, 누출량이 1%인 경우, 누출 위치가 배관 입구에서 멀어짐에 따라 출구 압력 값이 증가하며 누출량이 2%일 경우, 출구 압력은 누출 위치와 무관함을 알 수 있다. Table 5~7은 입구 압력에 대한 출구 압력 값 비와 Fig. 7~9에 대한 결과들을 보여준다.

IV. 결 론

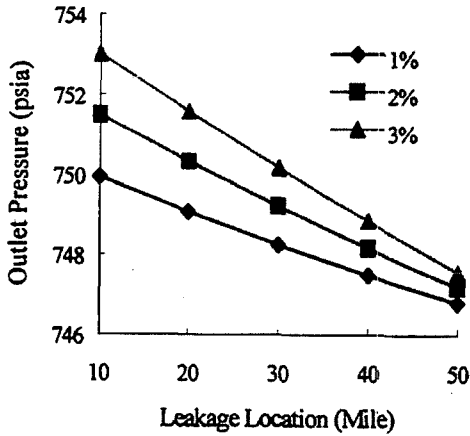


Fig. 9. Comparison of outlet pressures for leakage variations for downward flow.

본 연구에서 아래와 같은 결과들을 도출하였다.

1. 누출 현상이 파이프라인 출구 압력 값에 미치는 영향을 보정된 Weymouth 방정식을 이용하여 분석하였다.
2. 수평 유동의 경우, 본 연구에서 주어진 누출량이 출구 압력 값에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있다.
3. 상향/하향 유동의 경우 누출의 영향은 수평 유동에 비교하여 현저함을 알 수 있다.
4. 가스 유량의 증가 시, 경사각에 상관없이 출구 압력이 감소한다.
5. 수평/하향 유동의 경우, 배관 입구로부터 멀어질수록 누출량이 감소할수록 출구 압력이 감소한다. 그러나, 하향 유동의 경우, 출구 압력 값의 변화량이 수평

Table 5. Comparison of outlet pressure and ratio of outlet to inlet pressure for leakage variation for horizontal flow.

Leakage Location from Pipe Inlet (mile)	Horizontal Flow					
	p_2 (psia)			Ratio (p_2/p_1)		
	1%	2%	3%	1%	2%	3%
10	726.66	728.22	729.76	0.89271	0.89462	0.89652
20	726.26	727.53	728.79	0.89222	0.89378	0.89532
30	725.93	726.90	727.87	0.89180	0.89300	0.89419
40	725.65	726.33	727.01	0.89146	0.89230	0.89313
50	725.43	725.82	726.20	0.89119	0.89167	0.89214

Table 6. Comparison of outlet pressure and ratio of outlet to inlet pressure for leakage variation for upward flow.

Leakage Location from Pipe Inlet (mile)	Upward Flow					
	p_2 (psia)			Ratio (p_2/p_1)		
	1%	2%	3%	1%	2%	3%
10	704.06	705.63	707.18	0.86494	0.86687	0.86877
20	704.13	705.40	706.66	0.86502	0.86659	0.86814
30	704.25	705.23	706.20	0.86518	0.86638	0.86757
40	704.44	705.12	705.80	0.86540	0.86625	0.86708
50	704.69	705.08	705.46	0.86571	0.86619	0.86666

Table 7. Comparison of outlet pressure and ratio of outlet to inlet pressure for leakage variation for downward flow.

Leakage Location from Pipe Inlet (mile)	Downward Flow					
	p_2 (psia)			Ratio (p_2/p_1)		
	1%	2%	3%	1%	2%	3%
10	749.94	751.49	753.02	0.92130	0.92321	0.92509
20	749.07	750.33	751.58	0.92023	0.92178	0.92331
30	748.25	749.22	750.19	0.91922	0.92042	0.92160
40	747.49	748.17	748.85	0.91830	0.91913	0.91996
50	746.80	747.19	747.57	0.91744	0.91792	0.91839

유동에 비하여 훨씬 크다.

6. 상향 유동의 경우, 3%의 누출량에 대한 출구 압력 변화는 수평/하향 유동과 유사한 추세를 나타내지만 그 변화는 훨씬 완만하다.

참고문헌

- [1] Turner, N.C., "Hardware and Software Techniques for Pipeline Integrity and Leak Detection Monitoring", *SPE J.*, (1991)
- [2] GRID, "Leak Detection: Inside & Out", Gas Research Institute, **18**(4), (1995/1996)
- [3] Beggs, H. D., *Gas Production Operations*, OGCI Publications, (1984)
- [4] Kumar, S., *Gas Production Engineering*, Gulf Publishing Company, (1987)
- [5] Tian, S. and M.A. Adewumi, "Development of Analytical Design Equation for Gas Pipelines", *SPE Production & Facilities*, (1994)