

장거리 고압가스 배관경의 최적설계 기법에 관한 연구

윤 상 국
한국해양대학교 냉동공조공학과

Abstract

Evaluation of design factors for long-distance, high pressure gas pipeline was carried out and the inside diameter for nationwide natural gas pipeline network determined by the optimum diameter design method, was introduced. In this work, determining the average transmission cost per unit volume of gas is of prime importance. To select the proper pipe size for a given condition, extensive comparisons were made for many pipeline systems having various combinations of pipe diameter, and the lowest transmission cost system at the higher throughputs was obtained as the optimum diameter pipeline system. This work might help engineers to design industrial pipeline systems.

1. 서 론

국민생활 수준의 향상과 더불어 천연가스의 편리성과 청정성 때문에 지난 수년간 국내 수요가 급증하여 왔으며, 올해 425만톤에서 2000년에는 천만톤에 이를 것으로 전망된다. 이에 따라 장기 가스의 안정 공급을 위한 적정설비 규모의 유지 즉 새로운 가스 공급설비의 확충이나 현존하는 설비의 적정 증설 등은 중요한 과제이다.

공급설비중 배관설비는 일단 건설된 후 장기간 가스 공급에 이용되며 지하에 매설되므로 증설 및 개보수가 어려운 특징이 있다. 특히 장거리 고압가스 공급 배관경의 설계는 장기간 가스 공급에 따른 수요 증가량을 흡수할 수 있어야 하는 반면 직경이 클수록 초기 설비 투자비가 크게 소요되므로 최적 직경 선정은 매우 중요한 사업조건이 된다.

본고에서는 이러한 장거리 유체수송 배관경의 최적 설계시 고려하여야 할 인자들의 검토와 배관체계 및 최적 직경을 결정하는 방법을 적용하여 설계한 천연가스 배관 체계를 실사례로 제시하였다.

배관망 설계시 선정하여야 할 공급 지점별 적정 압력과 공급 유량은 공급 수요처의 특성에 맞춘 배관 network 형태, 교차 nod수, 배관경의 크기 등에 따라 Weymouth식, Panhandle식, Modified Panhandle식 등의 실험식을 이용하여 반복된 iteration 작업에 의하여 얻어진다.

본 연구에서는 많은 nod 구성의 복잡성을 배제하고 실 공급 배관 체계인 중·남부 연결 배관인 직·병렬과 환상연결 경우만을 고려하였으며 각 시점에서 수요량에 대한 배관체계별 공급 가능성을 평가하기 위하여 미국 Stoner사의 정상상태 배관망 해석 프로그램(SWS)을 사용하였다.

또한 배관경 결정 인자들을 고려한 최적 배관경 선정 및 민감도 분석은 자체 프로그램을 제작하여 검토하였다.

2. 가스유동관계식

천연가스와 같은 장거리 수송 배관 설계 및 해석을 위해서는 적정 배관 용량과 압력강하 계산이 필요하다. 정상상태, 건조가스가 이상기체라 가정할 때 Mass balance로부터 동일직경, 수평관에 대한 유동 일반식은 아래와 같다.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{f\rho u^2}{2g_c D} = \frac{PM}{ZRT} \frac{fu^2}{2g_c D}$$

$$\int dp = \frac{Mfu^2}{2Rg_c D} \int \frac{P}{ZT} dL$$

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{25\gamma_c q^2 z T f L}{D^5}$$

(배관망 해석 실험식)

윗 일반식으로부터 배관 직경 등의 조건 변화에 따른 압력강하와 유량간의 관계 계수를 도출하여 아래와 같은 배관망 해석 실험식이 제안되었다.

• Weymouth 식

직경이 15in 이하의 가스 고압 배관 해석에 적용되며, 단열, 수평관 및 정상상태를 가정할 때 가스 유량식은 다음과 같다.

$$q = 3.23 \frac{T_h}{P_b} \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) D^5}{\gamma_g Z T f L} \right]^{0.5}$$

• Panhandle 식

15 in 이상 대구경에 사용되는 식임

$$q = 435.87 \left(\frac{T_h}{P_b} \right)^{1.07781} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{TLZ} \right)^{0.5184} \left(\frac{1}{\gamma_g} \right)^{1.04894} D^{2.6182}$$

• Modified Panhandle 식

장거리 대구경 가스 공급망 해석에 널리 사용되는 식으로 본 연구의 검토 대상 배관 체계 해석에 사용되었다.

$$q = 737 \left(\frac{T_h}{P_b} \right)^{1.02} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2}{TLZ \gamma_g^{0.961}} \right]^{0.510} D^{2.530}$$

〈배관 연결 형태별 공급 증가량〉

가스수요가 증가하여 공급지역의 가스 압력이 강하될 경우에는 가스 공급량을 증가시키는 방법으로 기존 배관에 신규배관을 직렬·병렬 혹은 환상으로 연결한다. 각각의 배관 구성도는 그림 1과 같고 이에 따른 공급량 증가는 다음과 같다.

• 직렬연결 배관(Series pipeline)

$$\Delta q = \left[\frac{(1/L_{Aeq})^{0.65} - (1/L)^{0.5}}{(1/L)^{0.5}} \right]$$

• 병렬연결 배관(Parallel pipeline)

$$\Delta q = \left[\left(\frac{D_B}{D_A} \right)^{8/3} \left(\frac{L_A}{L_B} \right)^{1/2} \right]$$

• 환상연결 배관(Looped pipeline)

$$\Delta q = \left[\left(\frac{L_O}{L'} \right)^{0.5} - 1 \right]$$

여기서 $L' = L_{AB} + L_c$

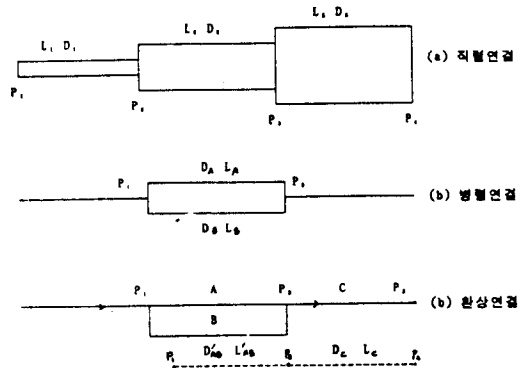


그림 1. 연결 배관 구성도.

$$L_{AB}' = \left[\frac{1}{(1/L_A)^{1/2} [1 + (D_B/D_C)^{8/3}]} \right]^2$$

3. 최적 배관경 설계 방법

3.1. 최적화 흐름도

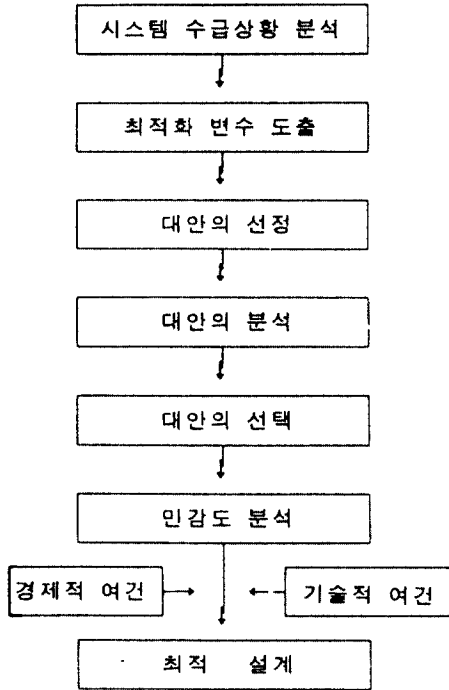
최적 배관시스템 설계시 경제성을 비교하여야 할 주요 인자들로는

- 적정 배관경
- 적정 송압지 거리 및 기지수
- 배관 다열화
- 침투부하 해소설비(SNG, LPG/AIR 혼합설비, Holder, LNG 위생기지) 등이 있으며 표 1은 이러한 인자들을 고려한 배관시스템 최적화 설계 절차도를 나타낸다.

3.2. 단계별 용도

- 시스템 수급상황 분석
 - 공급원 분석
 - 수요처 분석
- 연간 변동 및 계절 변동
- 일간 및 시간피크는 일반 소매 도시가스 판매사에서 흡수
 - 최적화 변수 설정
 - 설계연도
 - 적정 배관 크기 및 송압지의 필요성
 - 압력손실 4-34 Pa/m
 - 적정 운전압력
 - 장거리일수록 압력을 높게
 - 배관거리, 수급지접수, 수급지점압력, 공급압력,

표 1. 최적화 흐름도



비용

- 송압기지 필요시 압축기 압축비용
- 원심식 압축기의 압축비: <1.25-1.35
- 배관경과지
- 저장설비
- 대안의 설정
- 각 배관경과지에 대하여 2-3개의 대안 설정
- 설계년도의 Peak-day flow를 충족할 대략 설비

기술

- 개략투자비, 운전 및 유지보수비용 산출
- 저장설비에 대한 개략 경제성
- 각 대안에 대한 현가(Present Value Cost) 계산
- 연료비, 유지보수, 세금, 감가상각, 투자비회수, 물가상승률
- 송압기지 면적산출을 위한 평균 압축비율 산정 (송압기지 면적 및 크기 포함)
- 대안의 분석
- 각각의 인도에 대하여 대안별 load factor 분석
- Station의 위치 및 크기를 결정하기 위한 설계연도의 최대유량에 대한 시뮬레이션 실시
- 최적 비용 예측: 비용이 높은 대안 삭제

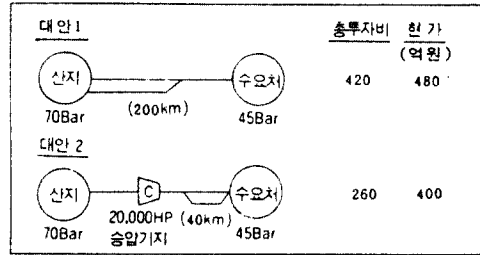


그림 2.

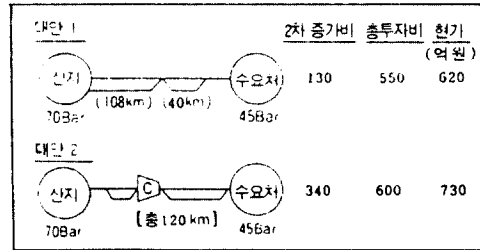


그림 3.

- 최적의 2-3개 대안 선정
- 최소/평균/최대 유량시의 분석
- 대안의 선정
- 현가가 가장 적은 안 선정
- 여러가지 안이 모두 5% 이내에 들어온다면 다음을 고려한다.

- 배관경이 큰 것(장래의 확장 여력 고려)
- 초기 투자비가 적은 것
- 운전이 용이한 것
- 민감도 분석

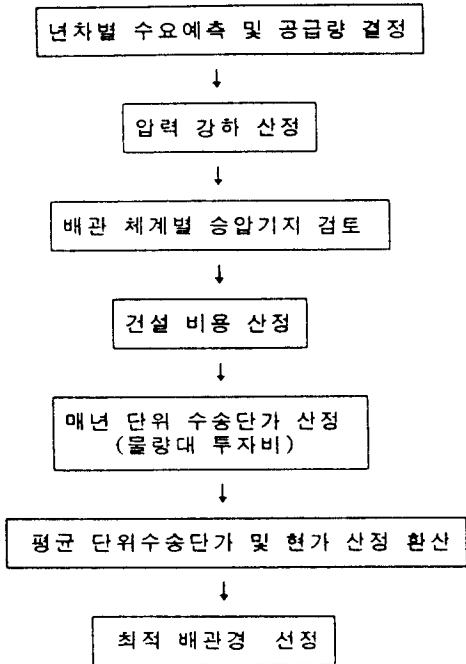
- 고정변수, 수송량, 자본비용, 연료, 운전보수비용, 물가상승률, 할인율 등의 변동에 대한 분석
- 가장 변화가 큰 변수가 무엇인가
- 최적 System 선정
- 최적 설계 및 최종 경제성 분석

3.3. 가스 수요 증가에 따른 적정 배관시스템 구축 방법

적정 수송배관경 및 시스템은 수송할 가스 수요량에 따른 총투자비, 수송단가를 비교하므로써 최적 설계가 이루어진다.

그림 2, 3은 각각 가스 수송량이 일 $2.5 \times 10^4 \text{ Nm}^3$ 과 $3.5 \times 10^4 \text{ Nm}^3$ 때의 배관시스템 체계별 총투자비 및 현가를 비교한 예를 나타낸 것으로 처음 일 2.5×10^4

표 2. 최적 배관경 선정 절차



Nm³의 가스량을 수송하는 시스템은 환상복선 배관보다 송압기지 건설이 경제적이다.

차후 가스 수요량이 일 3.5×10⁶Nm³로 증가되어 이 설비를 보완하고자 할 때는 송압기지를 설치하는 경우보다 복선의 확장 경우가 비용이 전체적으로 적게 소요된다.

이와같이 가스 배관망 설계시는 장기 수요 증가, 설비 확장 대안들을 고려하여 설계 시점에서 적정 설계가 이루어지도록 하여야 한다.

3.4. 최적 배관경 설계 방법

수요에 따른 최적 배관경 설계기준은 배관경별 가스 수송단가인 총 배관이용 기가중 수송된 가스량에 대한 투자비의 비로서 결정하며 구체적 선정 절차는 표 2에 나타내었다.

4. 예제 및 결과

최적 배관경 설계방법은 중남부 지역 천연가스 공급배관체계별 수송단가를 선정하여 설계에 반영한 실예를 사용하여 제시하고자 한다.

검토 대상이된 중남부 공급망의 권역별 배관망의

표 3. 배관망 체계별 연도별 송압기지 소요수

관계	30"-30"-30"	30"-30"-24"	30"-26"-26"	30"-24"-24"
2001	-	-	1	1
2002	1	1	2	2
2003	2	2	3	4
2004	4	4	7	7
2005	5	6	-	-
2006	7	8	-	-

길이는 중부권(평택-대전 131 Km, 영남권(대전-부산-창원) 382 Km, 호남권(대전-광주) 211 Km, 남부권(광주-창원) 278 Km로서 검토 배관체계는 영남·호남·남부권 배관경이 각기 30"-30"-30", 30"-30"-24", 30"-26"-26", 30"-24"-24" 경우였다.

4.1. 수요증가에 따른 배관의 공급 용량 평가

배관망 연결형태에 따른 공급량 증가의 효과는 SWS 배관망 해석 프로그램을 사용하여 권역별 압력변동 추이를 측정하여 평가하였다.

중부권 이남의 영·호남·남부 연계 배관은 평택지에서 75 Bar로 1차 송압하여 말단 지점인 부산 지역의 압력을 20 Bar 이상으로 공급하고 30"-30"-24"의 배관체계를 기준으로 할 때, 부산-창원 구간이 연결되지 않는 배관망(직렬식 연결 배관) 경우는 1999년까지의 부산지역 가스수요를 공급할 수 있으나, 부산-창원 가스공급 배관을 연결(환상식 연결 배관) 경우 2001년까지의 가스 수요량을 공급 가능하게 되어 연결한 환상식 경우 2001년까지 가스 물량을 공급 가능하게 되는 효과를 가져온다. 이 공급가능 년도후의 증가된 가스수요량을 공급하기 위하여는 배관의 복선화나 송압기지(1기당 27,000마력급) 혹은 신규인수기지 건설 등을 고려하여 비교하였다.

표 3은 배관경 경우별 연도별 송압기지 소요수로서 송압기지 7기 이상의 경우는 배관의 복선에 의한 공급체계가 경제성이 큰 것으로 분석되었다.

4.2. 적정 배관경 검토

적정 배관경 선정은 연차별 가스 수요에 따른 단위 가스량(Nm³)을 단위거리(km)당 공급하는데 배관 시스템별 수송단가 선정 프로그램을 개발하여 선정, 비교하였다.

중부권 이남의 배관망은 30-50년 후까지 가스를 수송하게 될 것이므로 50년간의 가스 수송 물량을 흡수하는 설계 체계가 바람직한 것이나, 현 여건상 제작기술

장거리 고압가스 배관경의 최적설계 기법에 관한 연구

등 한계가 있으므로 설비 이용 검토 기간은 '96년부터 2026년까지 30년간의 가스수송량을 기준하였다. 그림 4는 현가로 산정한 배관 체계별 공급 가스량당 수송단가를 나타내는 곡선으로 년 2.6×10 Ton 이상 대유량 공급시는 30"-30"-30"과 30"-30"-24" 배관경이 경제성이 크며 년 2.6×10 Ton 이하 공급할 시는 30"-26"-26"와 30"-24"-24" 배관 체계가 적절하게 된다.

배관 설비 경제성에 영향을 미치는 각종 인자들, 즉 고정변수, 수송량, 자본 비용, 연료, 운전보수비용, 물가상승률, 이자, 건설 시기 등의 변동에 따른 가스 수송단가에의 영향을 30"-30"-24" 배관망 경우에 대하여 검토하여 표 4에 나타내었다.

제반 검토 인자 중 수송단가에 가장 큰 영향을 미치는 것은 이자율이며, 연료가스 요금, 건설기간 등은 상대적으로 미비함을 알 수 있다.

5. 결 언

장기간의 수요증가에 적절한 장거리 대규모의 천연가스 배관경 설계방법은 배관공급 체계별로 수송단가가 제일 적은 배관시스템을 채택하는 것이며 본 연구에서는 설계시 고려해야 할 각종 고려인자 검토와 우리나라 중부권 이남 적정 배관경 결정 사례를 제시하였다.

최적 배관경 산정시 고려인자로는 년차별 수요 및 증가량, 설비 내용변수, 적정 운전압력, 송압기지 유무, 배관망 구축시스템 등이며 이를 고려하여 Panhandle 식을 이용한 SWS 배관망 해석 프로그램과 개발한 수송단가 프로그램을 사용하여 말단 공급지역인 부산의 공급가능 년도와 중부이남 권역의 공급배관 직경을

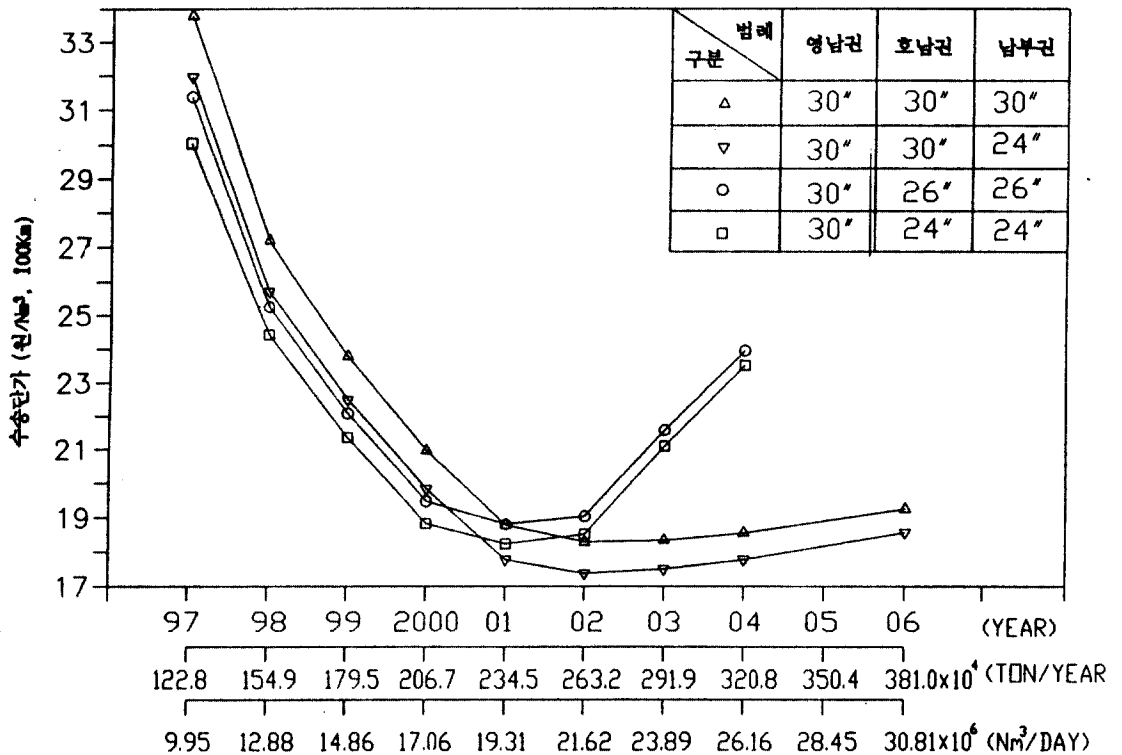


그림 4. 중부이남 배관경에 따른 수송단가

표 4. 배관 수용단가의 민감도 분석

배관경	인자	기준	변경	수송단가 (₩/Nm ³ , 100 km)	변동율 (%)
영남: 30"	이자율	10%	10%	17.37	+
호남: 30"			11%	23.17	133
남부: 24"			12%	30.85	178
			13%	41.02	236
			14%	54.44	313
	물가상승률	9%	10%	17.51	101
			11%	17.69	102
			12%	17.89	203
			연료가스요금 (₩/Nm ³)	126.68원	10%(139.35) 20%(152.02) 30%(164.68)
	건설기간	25년	35년	17.37	100
			배관비용	10%	18.67
	배관수용	30년	40년	34.13	196
			50년	71.38	414
			승압기지 가동일수	30일	90일
	운전부소비용	실비비 5%	실비비 7%	17.49	101

산정하였다.

배관에 의한 가스 수송은 해마다 수요가 증가하고 배관은 일단 매설되면 30년 이상 사용되기 때문에 초기 투자비가 크더라도 향후 수요 신장률을 고려하여 대구경을 가능한한 선정하여야 한다. 그림 4의 가스 수송단가 곡선은 영남·호남·남부권 각지 30"-30"-24" 이상의 구경이 적절함을 보여준다.

또한 제바 검토 인자 중 수송단가가 가장 큰 영향을 미치는 것은 이자율이며 연료가스 요금, 건설기간 등은 상대적으로 미미하다.

끝으로 이 연구가 국내 장거리 산업배관을 설계하는 분들에게 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

Nomenclature

- D : Pipe internal diameter, in
- f : Friction factor
- L : Pipe length
- Lo : Original length of pipeline
- L' : Equivalent of pipeline after looing=L'+Lc
- P : Pressure, psi
- Pb : Base pressure, psi

- P1 : Inlet pressure, psi
- P2 : Outlet pressure, psi
- q : Gas flow rate, MMscfd(at 14.7 psia, 60 F)
- T : Average temperature
- Z : Compressibility factor
- γ_x : Gas gravity(air=1)

참고문헌

1. W.R. True, Interstate pipelines' efficiency continues improving, Oil&Gas Journal, Nov. 25 (1991).
2. Nordberg Manufacturing Co., Selection of compressing equipment for gas pipe lines, Bulletin 226 (1954).
3. N. Banerjee, Trans-Asiank pipe line: a prefeasibility study, Pipe Line Industry, Nov. (1991).
4. American Gas Assoc., Gas Enginerr's Handbook, N.Y., Industrial Press (1965).
5. Stephenson D., Pipeline design for water engineers, N.Y., american Elsevier Publishinkg Co. (1976).
6. Katz D.L. et al., Handbook of natural gas engineering, N.Y., McGraw-Hill (1959).