

# 천연가스 기화기용 해수배관망 해석에 관한 연구

김호연\* · 이정환\* · 김동혁\* · 백영순\*  
한국가스공사 연구개발원\*

## A Study on the Analysis of Seawater Pipeline Network for Open Rack Vaporizers

Ho-Yeon Kim\*, Jeon-Hwan Lee\*, Dong-Hyuk Kim\*, Young-Soon Baek\*  
R&D Division, Korea Gas Corporation\*

### 1. 서론

천연가스 생산기지의 기화설비는 주로 해수를 가열원으로 하여 액화천연가스를 기화시킨다. 본 설비는 수직형 원심펌프로부터 배관을 통해 해수를 공급받는다. 그러나 배관망의 복잡성 때문에 해수공급의 효율성을 판단하는 데 다소의 어려움이 발생되고 있는 실정이다.

현재까지 배관망 해석이론은 주로 밀폐형 라인을 토대로 발전되어 왔다. 그러나, 본 설비는 개방형 라인으로 구성된 이중 공급 구조식 배관망을 형성하고 있다. 본 설비에 대한 해석적인 접근을 시도하기 위해서 우선적으로 기존의 배관망해석이론인 Hardy-Cross법,<sup>(1)</sup> Newton-Raphson법,<sup>(2)</sup> Linear Theory법,<sup>(3)</sup> Segregated CFD Approach<sup>(4)</sup>를 검토하여 하나의 해석법을 선택하였다.

여기서, 선택된 Linear Theory법은 초기치가 필요없고, 빠른 수렴성을 가지고 있으며, 특히, 수두계산이 아닌 유량계산을 근간으로 하기 때문에 본 개방형 해수 배관망의 공급유량을 해석하는 데 보다 편리하여 본 방법을 부분적으로 보완하여 해석적으로 접근하였다.

### 2. 수학적 모델링

천연가스 기화설비용 해수 배관망은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 제1공장에는 해수펌프가 P1부터 P5까지 5대의 펌프, 10대의 해수가열기, 5대의 기화기가 설치되어 있다. 그리고 제2공장에는 P6부터 P9까지 4대의 펌프, 해수가열기 6대, 기화기 3대로 구성되어 있다.

우선적으로 배관라인은 연결점과 파이프를 구분하여 113개의 노드와 144개의 파이프로 나누어 번호를 부여하였다. 특히, 대기압 상태로 방출되는 파이프의 말단 부분에 노드를 만들어 그 노드에서 정압을 계산할 수 있도록 하였다.

본 시스템의 해석에 필요한 방정식은 일반적으로 알려진 노드에서의 연속방정식과 루프의 에너지방정식을 사용한다. 연속방정식은 식(1)에 의해서 113개의 방정식이 유도되었다.

$$(\sum Q_i)_{out} - (\sum Q_i)_{in} = C \quad (1)$$

여기서, C는 외부유동으로 노드 안으로 들어오면 + 부호를 갖고, 나가면 - 부호를 갖는다. 그리고 에너지방정식은 중첩되지 않는 것으로 실제루프와 펌프에 의한 가상루프로 나누어 유도된다. 실제루프에 의한 에너지방정식은 식(2)를 사용하여 23개의 에너지방정식을 구했다.

$$\sum K_i Q_i^{n_i} = 0 \quad (2)$$

여기서, 각 항은 시계방향의 유동을 가지면 + 부호를 반 시계방향이면 - 부호를 갖는다. 그리고, 펌프에 의한 가상루프의 해석적 근거는 Jeppson의 문헌<sup>(5)</sup>을 토대로 하였다. 우선, 가상루프의 수는 펌프 수에서 하나를 뺀 수와 같다. 즉, 가상루프는 P1-P2, P1-P3 등으로 8개의 루프가 형성된다.

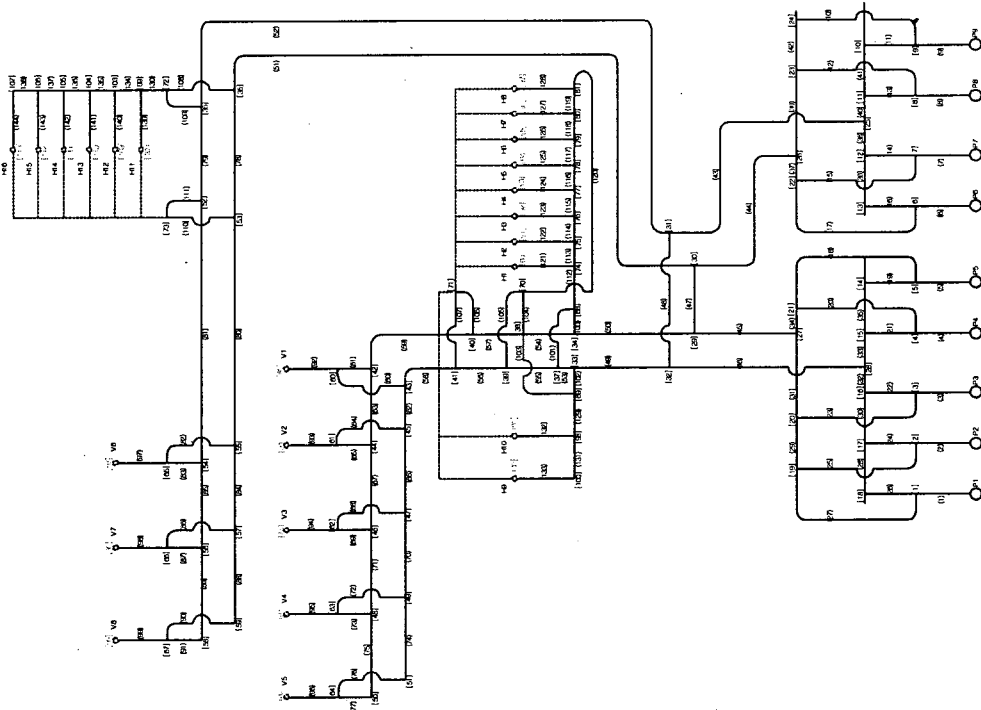


Fig. 1 Analytical model on seawater network

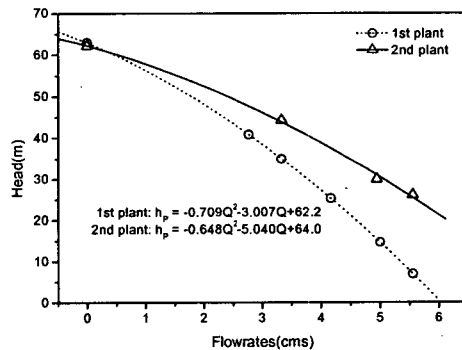


Fig. 2 Pump characteristic curves

다. 또한 펌프에 의해서 형성된 가상루프에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\sum K_i Q_i^{m_i} \pm \sum h_p = \Delta H \quad (3)$$

여기서, 펌프에 대한 수두는 제1공장과 제2공장이 다른 특성곡선<sup>(6)</sup>을 가지며 그것은 Fig. 2와 같다. 일반적으로 펌프의 특성곡선은 식(4)의 2차

다항식으로 표현된다.

$$h_p = AQ^2 + BQ + H_o \quad (4)$$

특히, 선형해석법에서는 2차의 다항식으로 된 펌프특성곡선을 직접적으로 처리하는 데 어려움이 있기 때문에 식(5)의 변환된 식을 사용한다.

$$h_p = AG^2 + h_o \quad (5)$$

여기서,

$$h_o = H_o - \frac{B^2}{4A} \quad (6)$$

각 노드에서의 정압계산은 최초에 펌프가 부착된 파이프의 유량으로부터 펌프의 수두를 계산하고 그 수두로부터 다른 노드에 정압을 계산하게 된다. 그 계산방법은 Fig. 3에 보는 바와 같이,  $\ell$  파이프에 화살표 방향의 유동이 발생되고 그 때 유량에 대한 수평선상의 수두손실이  $H_f$  이고, 각각의 해고를 갖고 있는 노드  $i, j$  가 있다. 여기서,

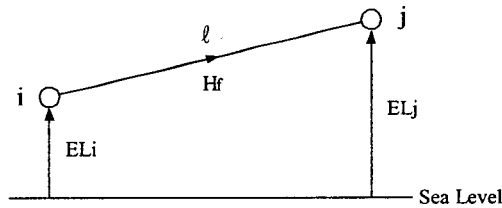


Fig. 3 Simple model for finding static pressure

$i$  노드의 정압을 알고 있다면,  $j$  노드의 정압계산은 식(7)과 같다.

$$H_j = H_i - H_{f\ell} + EL_i - EL_j \quad (7)$$

반대로,  $j$  노드의 정압을 알고  $i$  노드의 정압을 계산하기 위해서는 식(8)을 사용한다.

$$H_i = H_j - H_{f\ell} - EL_i + EL_j \quad (8)$$

또한, 식(7)-(8)로 계산된 각 노드에서의 정압은 직접적으로 펌프에 가장 인접된 노드에서의 평균정압과 해수식 기화기 방출부분에서의 평균정압을 계산하는 데 사용된다. 그 평균 정압은 식(9)와 식(10)에 나타나 있다.

$$\overline{H_P} = \frac{\sum H_{P,i}}{N_{pump}} \quad (9)$$

$$\overline{H_{orv}} = \frac{\sum H_{orv,i}}{N_{orv}} \quad (10)$$

식(9)와 식(10)은 간접적으로 해수식 기화기로 방출되는 유량의 추정치를 보정하는 데 사용된다. 그 방법은 Fig. 4에 보는 바와 같이, 추정치에 의해 계산된 펌프의 평균공급유량에 의해서 결정된 수두와 식(9)와 식(10)의 차에 의해서 계산된 수두 차에 의해서 증분 유량이 결정되게 된다. 여기서 결정된 증분 유량은 해당 기화기에서의 정압분율에 의해서 방출되는 기화기의 유량치를 재 보정하게 되며 그 식은 다음과 같다.

$$Q_{orv,j} = Q_{orv,j} + \frac{H_{orv,j}}{\sum H_{orv,j}} \times \lambda \Delta Q \quad (11)$$

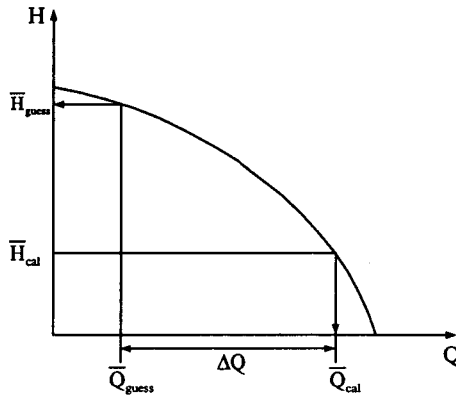


Fig. 4 Principle of an incremental flow rate

특히, 식(11)에서  $\lambda$ 는 가중치로서 계산에 대한 수렴속도에 직접적인 영향을 미친다. 또한, 본 가중치의 적용은 계산상에서 펌프특성이 다른 펌프의 추정치 수두와 계산치 수두의 일치점을 찾는 데 보간법 사용이 불가능했기 때문에 적용한 것이다.

### 3. 계산 및 결과

이중 공급구조식 해수 배관망 해석을 위한 주요 계산절차는 Fig. 5에 보여 주고 있다. 또한, 2개의 반복루프가 있다. 하나는 추정치에 대한 밀폐형 배관망을 풀기 위한 것이고 또 하나는 개방형에서 방출유량의 추정치를 보정하기 계산루프이다.

우선적으로 계산절차에 대하여 기술하자면, 첫번째 단계에서 배관에 대한 기하학적 데이터와 지배방정식들에 대한 입력데이터를 받는다. 그 다음은 대수식에 대한 계수행렬과 기지벡터를 만들게 된다. 그리고 나서 대수식을 풀게 되고 계산된 배관의 유량으로부터 마찰계수를 결정하게 된다. 특히, 여기서 마찰계수는 난류인 경우에는 Colebrook과 White가 제안한 다음의 식<sup>(7)</sup> 사용했다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log_{10} \left( \frac{e}{D} + \frac{9.35}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (12)$$

층류인 경우에는  $f=64/Re$ 를 사용하였다. 여기서, 계산된 마찰계수는 각 유량계산이 수렴되는지를 판단해서 그렇지 않으면 다시 에너지 방정식의 지수식인  $K, n$ 을 치환해서 반복적으로 계산하게 된다.

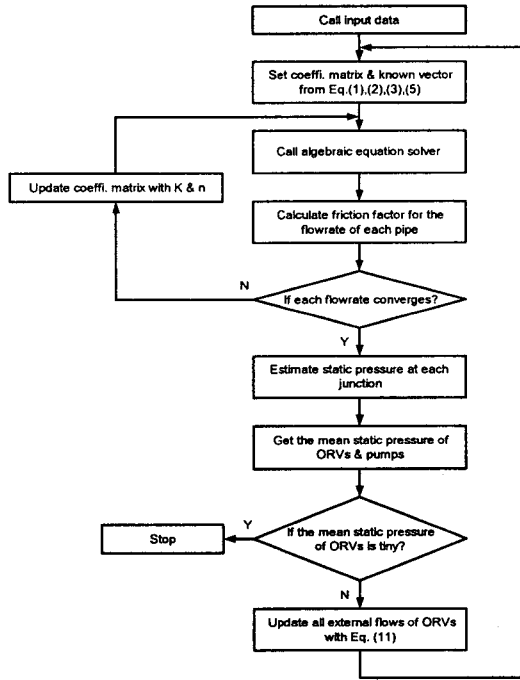


Fig. 5 Flowchart of a calculation algorithm

다음루프는 개방형 배관망의 방출되는 유량치를 보정하는 단계로 각 노드에서의 정압과 펌프들의 평균정압과 ORV출구의 평균정압 가지고 추정치 유량을 식(11)을 보정하게 된다. 그리고 ORV출구의 평균정압이 대기압에 가깝게 되면 프로그램을 종료하게 된다.

본 알고리즘으로 계산된 결과는 Table 1과 같다. 그리고 해수가열기에 대한 유량조건은 300 m<sup>3</sup>/h로 일정한 유량조건을 주었다. 실제 시스템에서 내부의 24개 노들에 대한 상당길이 산출이 불가능 했고, 더우기 해수가열기 집수 설비내 펌프가 수위레벨센서에 의해서 가동되기 때문에 연속적인 해석이 어려웠다. 또한, 해수가열기로 공급된 유량은 어느 시간 내에서 다시 주 배관으로 공급된 유량과 동일하고 주배관에 흐르는 유량에 비해 상대적으로 적기 때문에 일정 유량조건으로 계산하는 것이 편리하였다.

본 알고리즘은 개방형 루프를 계산하는 데 계산속도가 다소 느리다는 단점이 있지만 수렴성은 상당히 좋은 것으로 나타났다. 그리고 본 프로그램에 대한 정확도는 프로그램 계산알고리즘보다 배관의 상당길이를 정확하게 산출하는 데 크게 의존하는 것으로 나타났다.

Table 1. Computation results

Facility	FR(m <sup>3</sup> /h)	Facility	FR(m <sup>3</sup> /h)
P1	10,862.2	V1	13,799.3
P2	10,862.2	V2	15,236.8
P3	10,862.3	V3	15,049.3
P4	10,862.3	V4	14,964.3
P5	10,862.2	V5	14,942.2
P6	17,228.0	V6	16,474.1
P7	17,228.0	V7	16,389.7
P8	17,228.0	V8	16,367.7
P9	17,228.0	-	-

#### 4. 결 론

본 연구는 선형해석법을 이용하여 개방형 이중공급 구조식 해수배관망을 해석하는 기초를 마련하였다. 부분적으로 대수식을 효과적으로 처리하는 방법과 펌프의 운전점을 보다 빠르게 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것이 보완사항으로 남아 있다.

본 해석방법은 대형화된 생산설비에서 공급되는 유량의 가치를 평가하고 이용효율을 극대화 하는 데 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국가스공사 연구개발사업비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 기 호 설 명

$Q$	: Flow rate[m <sup>3</sup> /h]
$C$	: External flow[m <sup>3</sup> /h]
$K$	: Constant coefficient
$n$	: Power coefficient
$h$	: Head of pump[m]
$H$	: Head[m]
$A, B$	: Constant
$EL$	: Elevation[m]
$\lambda$	: Weight factor
$f$	: Friction factor
$e$	: Roughness[m]
$D$	: Diameter
$Re$	: Reynolds number

#### 하첨자

$i, j, o$	: Index
$p, P$	: Pump
$orv$	: Open rack vaporizer
$ump$	: Pump

#### 참 고 문 헌

- (1) Cross, H., 1936, "Analysis of flow in networks of conduit or conductor," University of Illinois Engr. Station, Urbana, III, Bulletin No. 286.
- (2) Martin, D.W. and Peters, G., 1963, "The application of newton's method to network analysis by digital computer," Journal of the Institute of Water Engineers, Vol. 17, pp. 115~129.
- (3) Wood, D.J. and Charles, C.O.A., 1972, "Hydraulic network analysis using linear theory," J. of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. HY7, pp. 1157-1170.
- (4) Greyvenstein, G.P. and Laurie, D.P., 1994, "A segregated CFD approach to pipe network analysis," Int. J.

for Numerical Methods in Engineering, Vol. 37, pp. 3685-3705.

- (5) Jeppson, R.W., 1977, "Analysis of flow in pipe networks," Ann Arbor Science, Michigan.
- (6) Korea Gas Corporation Incheon LNG Receiving Terminal, 1994, "Mechanical Data Book," P.O.# 94-052, Vol. 1.
- (7) Colebrook, C.F., 1938-1939, "Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition between the smooth and rough pipe laws," J. Inst. Civ. Eng. Lond., Vol. 11, pp. 133-156.