

고압 LNG 배관망의 특성 및 비용절감 효과

김호연[†] · 홍영수 · 노주영 · 엄운성 · 김철만

한국가스공사 연구개발원

(2008년 3월 17일 접수, 2008년 10월 18일 수정, 2008년 10월 18일 채택)

Features and Cost Reduction Effect of High Pressure LNG Pipeline Network

Ho-Yeon Kim[†], Young-Soo Hong, Joo-Young Noh, Yun-Seong Eom and Cheol-Man Kim

R&D Division, Korea Gas Corporation

(Received 17 March 2008, Revised 18 October 2008, Accepted 18 October 2008)

요 약

최근 유가의 고공행진 때문에 한국은 해외 에너지 자원개발뿐만 아니라 에너지 소비를 줄이기 위한 국가적 정책으로 기존 설비의 에너지 효율을 증가시키는 방안을 모색하는 것이 필요한 시점이다. 따라서 본 연구는 이런 국가적 사안에 부합하고자 인천생산지지 고압 LNG 배관망에 대하여 수정유량방정식을 사용한 Newton Method로 접근하였고, 유량조절밸브(FCV)에 의해 지배적인 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 고압 펌프는 유량조절밸브 50%의 개도율에서 최고효율을 보여 주었고, 고압배관망 내에서 배관저항곡선은 LNG 헤드가 1,500m 이상이 되어야만 토출이 가능한 것을 보였다. 고압펌프의 운전점으로부터 운전비용을 산출하였고, 최고 효율시 운전비용과 비교하여 운전비용을 절감할 수 있는 금액을 산출하였다. 특히 일간 시간대별 운전비용 절감액뿐만 아니라 연간 일별 운전비용 절감액을 산출하였으며, 그 결과 고압배관망은 연간 138백 만원을 절감할 수 있다. 이것은 연간 고압펌프 1기당 9,823천원을 절감할 수 있다는 것을 의미한다. 결론적으로 본 연구는 복잡한 고압 LNG 배관망에서 고압펌프의 운전특성과 운전비용 절감효과를 확인할 수 있었다. 또한 이것은 미시적으로 생산기지의 효율적 미래운영에 대한 기여와 더불어 거시적으로 국가 에너지 경쟁력 제고에 기여할 수 있을 것이다.

주요어 : LNG, 배관망, 고압펌프, 운전비용

Abstract — Recently due to march as the high oil price, It is necessary for Korea to grope a plan, which is to increase the energy efficiency of existing facilities as well as to develop overseas gas and oil resources. With this point, this work carried out to approach the high pressure LNG pipeline network of Incheon receiving terminal with Newton method as corrective flowrate. We found that the high pressure network mainly depends on FCVs (Flow Control Valves). The high pressure pump showed the maximum efficiency at the FCVs of 50% opening and could discharge LNG only above the LNG head of 1,500m from a system curve obtained. The operating cost of pumps was estimated from their operating points. We compared the operating cost under normal operation with the operating cost under maximum efficiency. Especially, we obtained the day savings of a year as wells as the hour savings of a day. From the results, the high pressure network will be able to reduce the operating cost of 138 million wons in a year. This means that a pump can reduce the operating cost of 9,823 thousands won. Consequently, this work could find the operating features of the pumps under

[†]To whom correspondence should be addressed
638-1, il-dong, sangrok-gu, Ansan, Kyunggi-do,
South Korea, 426-790
Tel : 031-400-7551
E-mail : hoykim@kogas.re.kr or hoykim@kogas.or.kr

the complicated high pressure LNG network and the savings effect of the pump operating cost. Also, the results will be able to macroscopically contribute the heightening of national energy competitiveness as well as to microscopically contribute the future effective operation of LNG receiving terminal.

Key words : LNG (Liquefied Natural Gas), Pipeline Networks, High Pressure Pump, Operating Cost

1. 서 론

액화천연가스(LNG)는 고유가 시대로 접어들면서 국제적인 수요가 계속적으로 증가하고 있으며, 한국은 세계 10위의 에너지 소비대국으로 97%의 에너지를 수입에 의존한다. 특히 고유가 시대가 지속되면서 에너지 수입에 66조원 이상을 사용하고 있다. 에너지 빈국으로서 국가적 에너지 경쟁력을 확보하기 위해서는 해외 자원개발뿐만 아니라 기존 설비의 에너지 효율을 증가시킴으로서 국가적 에너지 부담을 부분적으로 줄일 수 있을 것이다.

본 연구는 생산기지 LNG 고압배관망의 특성을 분석하고 그 결과를 토대로 효율적 설비 운영시 비용절감 효과를 파악하기 위해 수행되었다. 우선 LNG 고압배관망의 특성을 분석하기 위해 수정유량방정식을 이용한 Newton Method^[1]을 사용하여 LNG 배관망의 펌프 및 배관의 물리적 특성을 분석하였다. 그리고 고압펌프의 운전점으로부터 전력량을 계산하고 한국전력 고시의 전력단가^[2]를 이용하여 총비용을 산출하였다. 총비용의 흐름은 고압펌

프 토출측에 있는 유량조절밸브(FCV)에 의해서 지배적인 영향을 받고 주배관에서 공급량과 수요량의 변화에 의해서 부분적으로 영향을 받는 다는 것을 확인할 수 있었다.

결론적으로 본 연구는 생산기지 LNG 고압배관망을 수치해석적으로 접근하여 특성을 분석하고, 그 비용흐름을 분석함으로써 생산기지의 효율적 운영방안 및 연간 비용절감 효과를 도출할 수 있었다.

2. 지배방정식

인천생산기지 제2공장 고압 LNG 배관망은 14기의 고압펌프, 2기의 재액화기, 그리고 205개의 파이프로 구성하였다. 또한, 27개의 실체루프와 펌프 가동수만큼의 가상루프가 존재한다. 특히, 재액화기의 경우 상류측에 저압펌프와 증발가스 압축기에 의해서 항상 압력이 약 0.8 MPa로 유지된다. Fig. 1은 고압배관망의 수학적 모델링을 보여 주고 있다.

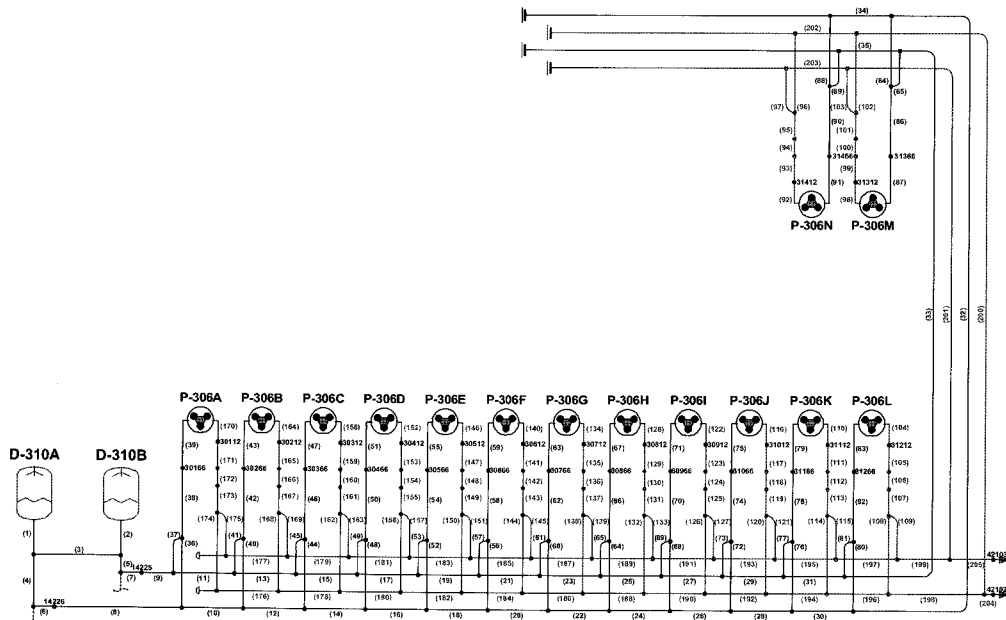


Fig. 1. Mathematical model of high pressure LNG pipeline network.

본 배관망을 풀기 위한 해석기술은 대형 배관망 해석에 적합한 수정유량방정식을 이용한 Newton Method를 사용하였다. 실제루프 및 가상루프에 대한 에너지 방정식^[3]은 다음과 같다.

$$H_j(q) = \sum \pm k_i (|Q_i \pm q|)^{1.85} - h_p \quad (1)$$

파이프의 유량에 따른 압력손실은 Hazen-Williams식^[4]을 사용하였고, 다음과 같이 표현된다.

$$h_L = \frac{4.52Q^{1.85}}{C_{HW}^{1.85} D^{4.87}} \quad (2)$$

여기서, Hazen-Williams 계수 C_{HW} 는 150이 적용되었다. 식 (1)에서 펌프의 특성곡선은 측정데이터와 오차를 줄이기 위해 다음과 같은 3차의 다항식을 사용하였다.

$$h_p = AQ^3 + BQ^2 + CQ + D \quad (3)$$

LNG 펌프들의 성능곡선과 입력 전력은 Fig. 2에서 보는 것과 같다. LNG 펌프의 헤드는 매우 높기 때문에 저부하에서 제작사가 제공하는 성능데이터는 존재하지 않는다.

고압배관망의 인입 경제조건은 재역화기인 D-310A와 D-310B의 LNG 액위 해고와 압력을 적용하였고, 토출 경제조건은 파이프 204, 205 말단에서 해고와 측정된 압력을 적용하였으며, 그 차가 각 LNG 고압펌프의 헤드차로 가상루프의 경우 식 (1)의 좌측항에 적용된다. 실제루프의 경우는 0을 적용하게 된다. 그리고 LNG 고압펌프는 P-306B/F/G/L을 제외하고 모두 가동되는 조건이다.

본 고압배관망의 계산수행은 실제루프와 가상루프로 구성된 식 (1)의 연립방정식을 수렴할 때까지 계산을 수행하여 각 배관의 유량을 결정할 수 있다. 유량이 결정되면, 그 유량에서 헤드와 전력량이 산출된다.

3. 고압배관망 특성 및 비용절감 효과

3-1. 계산결과의 검증

고압배관망의 계산결과는 생산기지에서 측정되고 있는 펌프 흡입측의 압력, 토출측의 유량과 압력에 대한 절대오차로 비교하였으며, 절대오차는 다음과 같다.

$$\epsilon = \left| \frac{V_{computed} - V_{measured}}{V_{measured}} \right| \quad (4)$$

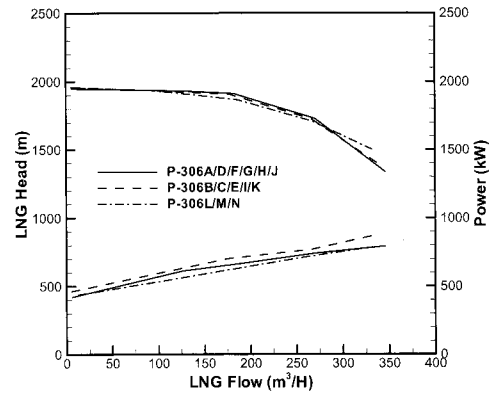


Fig. 2. Performance and power curve of pumps.

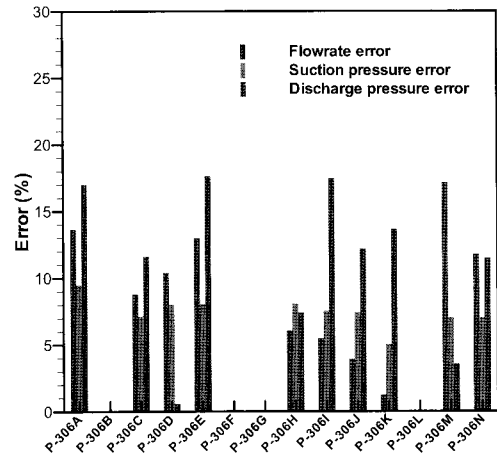


Fig. 3. Absolute error of computed results.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 유량의 최대오차는 17.6%이며, 흡입측 압력오차는 최대 9.5%, 토출측 압력오차는 17.1%이다. 유량의 평균오차는 11.3%, 흡입측 압력 평균오차는 7.5%, 토출측 압력 평균오차는 9.1%이다. 본 계산 결과는 정상상태로 수행되었고, 생산기지 계측값은 비정상상태의 값인 것으로 비추어 볼 때, 본 계산의 정확도는 엔지니어링 관점에서 타당하다.

3-2. 펌프성능 및 배관저항의 특성

고압 LNG 배관망의 특성을 분석해 본 결과, 고압배관망은 고압펌프 토출측에 있는 FCV (Flow Control Valve)에 주도적 지배를 받는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 P-306E의 FCV 개도율 변화에 따른 토출량과 효율을 보여 주고 있으며, LNG 토출량은 개도율 30% ~ 50% 사이에서 제어가 원활하게 이루어지고, 50% 이상

의 경우 개도율 변화에 의한 유량변화가 없어 제어가 어렵다는 것을 볼 수 있다. 특히 고압펌프의 효율은 개도율 50%에서 가장 높고 개도율이 40%이하로 감소하게 되면 급격한 효율감소를 초래하며, 개도율이 50% 이상으로 증가하면 효율은 증가하지 않고 서서히 감소하는 경향을 볼 수 있었다.

Fig. 5는 P-306E 펌프의 성능곡선과 FCV의 개도율 37%일 때, LNG 유량에 따른 배관의 저항곡선, 즉 시스템 곡선을 보여 주고 있다. 시스템 곡선은 LNG의 점도가 매우 낮고, 배관경 설계의 여유율에 의해 완만하게 증가하는 것으로 나타났다. 고압펌프는 LNG 헤드가 1500 m 이상이 되어야만 토출이 가능하고 그 이하면 토출이 불가능한 것으로 나타났다. 또한, FCV의 개도율 증가는 시스템곡선을 좌측으로 이동시키면서 급격하게 증가하게 되며, 개도율 감소는 우측으로 더 완만하게 증가하게 된다.

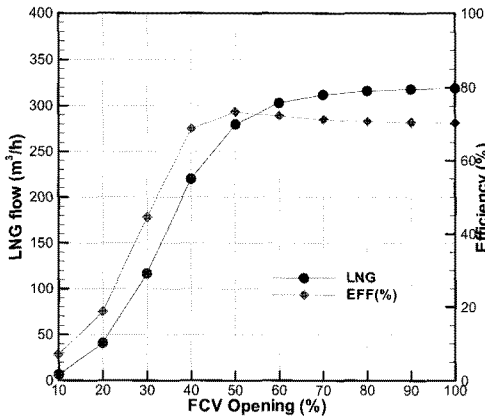


Fig. 4. LNG flowrate and pump efficiency with FCV opening.

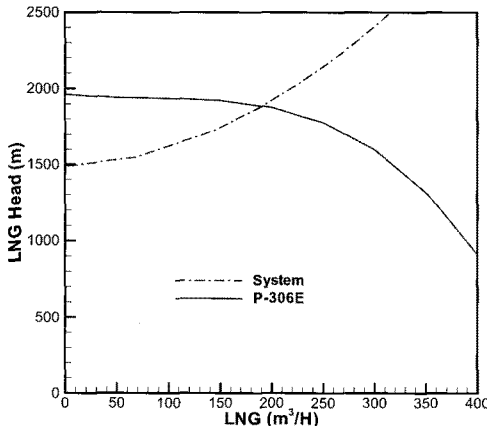


Fig. 5. Performance and system curve of P-306E.

3.3. 고압배관망의 비용절감 효과

고압배관망의 운전비용을 줄이기 위해서는 FCV의 개도율을 효율이 가장 높은 50% 수준으로 유도하는 데 있다.

Fig. 6는 P-306E의 운전비용, 송출단가, 효율을 보여 주고 있다. FCV의 개도율이 증가하면 소요전력이 증가하여 운전비용이 증가하게 된다. 개도율이 30%~50%에서 운전비용은 급격하게 증가한다. 또한 송출단가는 개도율이 40%이하로 감소하게 될 경우 매우 급격하게 증가하는 경향을 볼 수 있으며, 개도율이 40% 이상으로 증가하면 송출단가는 계속적으로 감소하나 그 단가의 차이는 매우 미미하며, 개도율이 60% 이상이 되면 배관 내 유량을 조정할 때, 모터에 의해 구동되는 밸브의 궤적이 커지게 되고 유량제어 효과가 떨어지게 된다.

고압펌프의 최고효율로 유도하여 운전함으로써 비용을 절감할 수 있으며, 이 때 비용절감 효과를 분석하기 위해서는 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

첫째, 고압배관망은 수요량 및 공급량의 변화에 의해 토출측 배관압력이 변화한다. 실제 생산기지 고압배관망에서 수요량을 확인할 수 있는 방법은 존재하지 않고 공급량만을 알 수 있다. 따라서, 최고효율로 유도시 비용절감효과는 인위적 비용절감 효과에서 자연적 절감효과를 제외하여 산출해야 한다. 그 식은 다음과 같다.

$$\dot{S} = \dot{A} - \dot{N} = c_A \dot{Q}_A - c_N \dot{Q}_N \quad (5)$$

여기서 자연적 절감효과는 토출압력의 변화로 부터 다음과 같은 방법으로 산출할 수 있다.

$$\dot{c}_N = \frac{c_{pc} \dot{Q}_{pc} - c_{pm} \dot{Q}_{pm}}{dQ} \quad \text{for } dp/dt < 0 \quad (6)$$

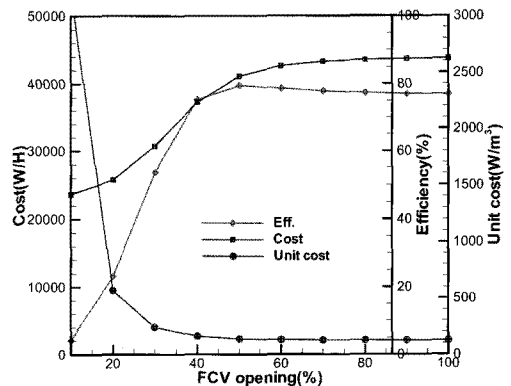


Fig. 6. Operating cost, unit cost and efficiency of P-306E.

$$\dot{c}_N = \frac{\dot{c}_{pm} \dot{Q}_{pm} - \dot{c}_{pc} \dot{Q}_{pc}}{d\dot{Q}} \text{ for } dp/dt > 0 \quad (7)$$

둘째, 일 시간대별 공급량 및 송출압력 변화율을 고려하여 비용절감 효과를 산출해야 하며 그 식은 다음과 같다.

$$S_d = \int_0^{dd} (\dot{c}_A \dot{Q}_A - \dot{c}_N \dot{Q}_N) dt \quad (8)$$

여기서, dt는 일일 시간변화율의 1.0 hr를 의미한다.

셋째, 연 일별 공급량 변화율을 고려하여 비용절감 효과를 산출해야 하고 그 식은 다음과 같다.

$$S_y = \int_0^{yy} (\dot{c}_A \dot{Q}_A - \dot{c}_N \dot{Q}_N) dt \quad (9)$$

여기서, dt는 연간 일일변화율을 고려한 것을 의미하며 그 시간은 1.0day를 적용했다.

Fig. 7은 하루의 공급량 변화를 보여 주고 있으며, Fig. 8은 공급량 변화에 대한 고압펌프의 최고효율 유지시 비용절감과 자연적 절감효과를 제외한 조건의 순수 비용절감을 시간변화에 대하여 보여 주고 있다. 자연적 절감효과는 인위적 절감효과에 5.6% 정도이며, 일일 비용절감 효과는 854천원 정도이고, 고압펌프 1기당 61천원 정도로 나타났다.

Fig. 9은 연간 LNG의 일일 송출량을 보여 주고 있으며, Fig. 10은 연간 일일 비용절감 효과를 보여주는 것으로 연간 일일 송출량의 변화에 비례하는 것을 볼 수 있다. 특히 동절기를 제외하고 LNG 송출량이 급감하기 때문에 비용절감 효과는 상대적으로 감소한다. 분석 결과에 의하면, 연간 비용절감 효과는 138백만원으로 나타났고, 고압펌프 1기당 9,823천원으로 분석되었다. 따라서

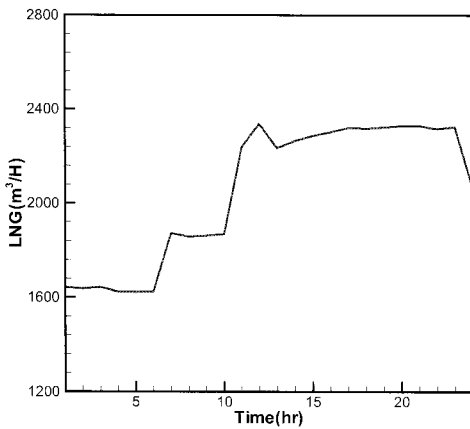


Fig. 7. LNG discharge with hour.

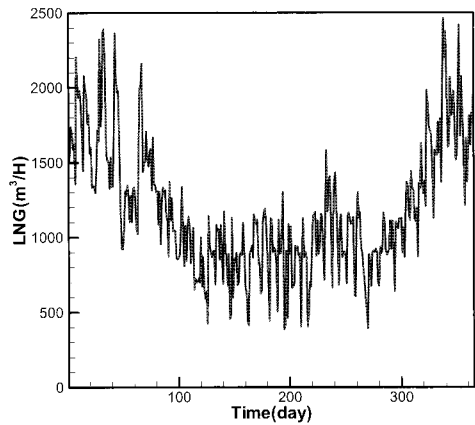


Fig. 9. LNG discharge with day.

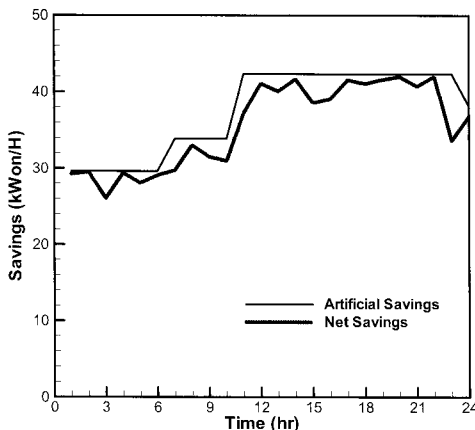


Fig. 8. Savings of LNG network with hour.

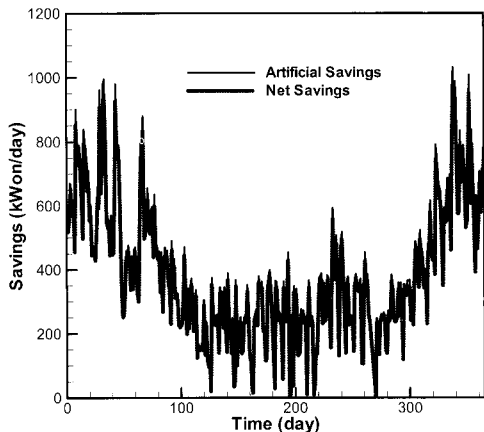


Fig. 10. Savings of LNG network with day.

고압펌프의 효율적 운전은 생산기지 내 고압 배관망의 에너지 사용을 최소화할 수 있다.

4. 결 론

인천생산기지 고압 LNG 배관망을 수치적으로 접근하여, 고압배관망의 특성을 분석하였고, 고압펌프의 효율적 운전이 운전비용을 절감할 수 있다는 것을 알게 되었다.

고압배관망은 FCV 개도율에 의해 지배적인 영향을 받으며, 그 개도율이 50%일 때, 최고 효율을 갖는 것을 발견하였다. 또한 최고 효율로 운전시 일일 운전비 절감액은 854천원 정도이고, 연간 비용절감액은 138백만원으로 나타났다. 이것은 에너지 소비를 최소화하고 수요처에서 요구되는 LNG를 충분히 공급할 수 있다는 것을 의미한다.

결론적으로 본 결과는 복잡한 고압 LNG 배관망에서 고압펌프의 운전특성과 운전비용 절감효과를 제시했다. 이것은 생산기지의 효율적 미래운영에 기여할 수 있을 것이다.

사용기호

A : 3rd order coefficients of pump
 \bar{A} : Artificial cost savings rate
 B : 2nd order coefficients of pump
 C : 1st order coefficients or Hazen-Williams constant
 \dot{c} : unit operating cost rate
 D : pipe diameter or constant coefficient of pump
 dp : pressure derivative
 $d\dot{Q}$: flowrate derivative
 dt : time derivative
 H : head in real or pseudo loop
 h : head of pump or head loss
 k : constant coefficient of exponential formula
 \dot{N} : natural cost savings rate
 Q : flowrate of pipe
 \dot{Q} : discharge flowrate of pump

Q : flowrate of pipe
 q : corrective flowrate of Newton method
 S : savings
 \dot{S} : savings rate
 V : measured or computed value

그리스 기호

ϵ : absolute error [%]

상첨자

dd : one day
 yy : one year

하첨자

A : artificial condition
 d : one day
 HW : Hazen-Williams
 i : index of pipe
 j : index of real or pseudo loop
 N : natural condition
 L : loss
 pc : current condition of pump
 pm : maximum efficiency condition of pump
 y : one year

참고문헌

1. Epp, R. & Fowler, A.G.; "Efficient Code for Steady-State Flows in Networks", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 96, No. HY1, Proc. Paper 7002, Jan., pp.43-56 (1970).
2. http://cyber.kepco.co.kr/cyber/personal/payment/payment_table/payment_table_02.html.
3. Jeppson, R.W., Asce, M. & Davis, A.L.; "Pressure Reducing Valves in Pipe Network Analyses", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 102, No. HY7, July, pp.987-1002 (1975).
4. Jeppson, R. W.; Analysis of flow in pipe networks, Ann Arbor Science (1977).