

## 광역상수도용 펌프의 전양정 결정에 관한 연구

김경엽\* · 최성일\*\* · 이정우\*\*\* · 손봉세\*\*\*\*

### 1. 서 론

펌프의 선정에 있어서 상수도 시설기준<sup>(1),(2)</sup>에 따라 최악의 조건(노후된 관로조건, 피크시의 유량공급, 실양정을 저수위부터 고수위까지 적용)인 상태를 고려하여 선정된 펌프의 전양정은 실제로 적용될 펌프의 운전양정보다 여유량이 상당히 포함되므로, 실제 운영시에는 운전범위를 벗어나게 되어 토출밸브로 제어하거나, 임펠러를 조정하는 방법으로 펌프가 안정하게 운전되도록 하고 있다. 그러나 이러한 방법은 최적상태보다 좋지 않은 조건에서 운전되므로 펌프 및 밸브의 수명단축, 부품의 고장 및 에너지의 낭비를 초래하여 운영비의 초과지출로 이어져 저효율 고비용의 원인이 되는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 단위과업에서는 선행 연구인 수도권 광역상수도<sup>(3)-(5)</sup> 및 일산 수도시설 등의 기초 조사를 통하여 얻어진 결과를 토대로 펌프 운전 조건의 변화에 따른 효율적이고 경제적인 운영을 위한 대책을 마련하고, 상수도 시설기준에 적용될 수 있는 펌프의 실양정 결정을 위한 기준안을 제시함을 목적으로 한다.

### 2. 실양정 결정방안

상수도의 수원을 구분하면 하천표류수, 하천복류수, 저수지수 또는 호소수 및 지하수(우물물) 그리고 용천수 등이며 수자원이 부족한 지역에서는 천수(빗물)나 해수를 수원으로 사용하는 경우도 있다. 한국수자원공사의 광역상수도는 1996년 말 현재 시설용량이 10,601천 $m^3$ /일이며, 이 중 76%인 8,061천 $m^3$ /일이 저수지수이고 24%가 하천표류수로 구성되어 있다. 안정된 급수틀

확보하기 위해서는 안정된 취수가 매우 중요하며, 취수펌프장 흡수정의 수위는 하천이나 저수지의 수위에 직접적인 영향을 받는다. 따라서 하천과 저수지의 수위 결정 방법을 살펴본 후 안정적인 취수가 이루어질 수 있는 범위 내에서 취수펌프가 경제적으로 운영될 수 있도록 펌프의 실양정을 결정하는 방안에 대하여 제시하고자 한다.

#### 2.1 하천의 수위

보통 하천수는 수량이 풍부하나 계절에 따라서 유량이 현저히 변한다. 하천에서의 일유량(日流量)은 수위-유량곡선식에 의하여 자기수위기록에 나타난 매 정시 수위로부터 유량을 구하여 1일간에 걸쳐 평균한 것이며, 보통 수위표에 의한 수위기록의 경우는 아침과 저녁 수위로부터 유량을 구하여 평균한 것이다. 유량은 유량관측소에서 측정된 일유량의 연간 상황을 나타낸 것으로서 일유량의 크기와 누가일수(累加日數)로서 표시한다. 이것을 Fig. 1과 같이 나타낸 것이 유황곡선도(流況曲線圖, flow duration curve)이다.<sup>(6)</sup>

하천수를 취수하는 펌프장의 흡수정에서 고수위(HWL)

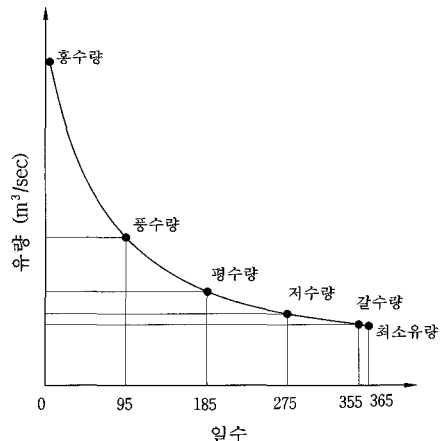


Fig. 1 Flow duration curve of river

\* 한국산업기술대학교 기계공학과  
 \*\* (주)한국종합엔지니어링  
 \*\*\* 휴먼아이티  
 \*\*\*\* 경원전문대학  
 E-mail : kykim@kpu.ac.kr

는 풍수위를 뜻한다. 한편, 안정적인 용수 공급을 목표로 하는 광역상수도에서 취수펌프장 흡수정의 저수위(LWL)는 Fig. 1에서 정의된 저수위로 설정하기보다는 1년 중에서 355일 이상 유지될 수 있는 갈수위로써 정하는 것이 바람직하다.

## 2.2 저수지의 수위

다목적 저수지는 홍수조절, 발전, 관개, 상수도, 농업용수 등 여러 가지 목적을 위해 사용된다. 저수지의 용량은 그 목적과 기능에 따라 구분되는데 하상으로부터 댐 마루까지의 배분용량은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 사수량을 포함한 불용용량, 활용용량, 홍수조절 전용용량 및 이상홍수용량으로 나누어진다. 또한, 저수지의 용량 배분과 관련하여 사수위, 저수위, 상시만수위, 제한수위, 홍수위, 최고수위 등이 결정된다.<sup>(7)</sup> 이수 목적상 저수지의 조작은 저수위와 상시만수위의 저수량으로 수행한다. 따라서 저수지를 수원으로 하여 취수하는 경우 펌프장의 흡수정에서 고수위는 저수지의 상시만수위를 뜻하며, 안정적인 용수 공급을 목표로 하는 광역상수도에서 취수펌프장 흡수정의 저수위는 앞에서 정의된 저수위를 말한다. 빈도가 가장 큰 평균수위(MWL)는 저수지 조작의 경험에 의하면 이용수심(LWL~HWL)의 위쪽 3분의 1 지점에 근접되기 때문에 일반적으로 저수지의 평균수위는 이를 기준으로 결정된다.

## 2.3 펌프장의 흡입수위

취수펌프장의 흡입수위는 하천이나 저수지의 수위

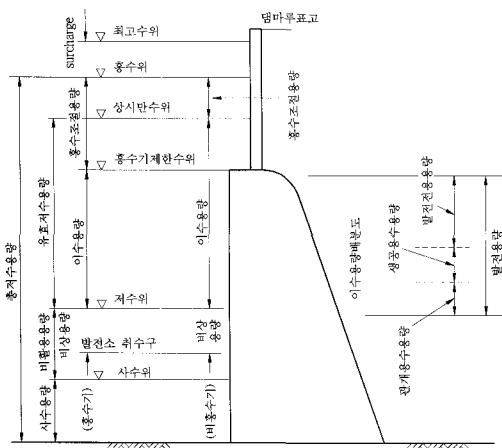


Fig. 2 Water levels of multi-purpose dam

와 비교하면 유입수로 또는 유입관에서 발생하는 손실수두 만큼 차이날 수 있으며, 일반적으로 수원의 수위에 따라 펌프장의 당초 설계시 계획 결정된다. 따라서 하천과 저수지를 수원으로 하는 대표적인 취수펌프장을 대상으로 흡수정의 수위 변화를 보다 상세히 분석한 후 안정적인 용수 공급과 경제적인 펌프 운영이 동시에 이루어질 수 있도록 펌프장의 운영일지를 토대로 저수위, 평수위, 고수위, 최저·최고수위 등의 흡입수위를 결정하는데 그 목적이 있다.

흡수정의 수위는 두 가지 방법 즉, 누가일수에 의한 방법과 통계학적 방법을 사용하여 각각 적용한 후 그 결과를 비교 검토하였다. 누가일수에 의한 방법에서 저수위는 1년 중 355일 동안 이보다 이하로 내려가지 않는 수위, 평수위는 1년 중 185일 이상 유지될 수 있는 수위, 고수위는 1년 중 10일 동안 이보다 이하로 내려가지 않는 수위로 정하였다. 통계학적 방법에서 저수위와 고수위는 확률밀도 분포선도의 95.5%에 해당되는 수위로 각각 설정하였다.

### 2.3.1 자양 취수펌프장

자양 취수펌프장은 한강 잠실 수중보에서 약 1km 상류 우안에 위치하여 일산 신도시 및 고양시에 용수를 공급하기 위한 시설물이다. 건설 당시 흡수정의 저수위는 6.0m, 평수위는 6.2m, 홍수위는 18.5m로 계획 설계되었다. Fig. 3은 1993년에서 1998년까지 6년 동안 자양 취수펌프장의 흡수정에서 측정된 흡입수위에 대한 해당일수를 나타내었다. 수위에 대한 누가일수는 Fig. 4에 나타내었는데, 이 곡선은 하천의 유풀곡선도와 마찬가지로 전형적인 형태를 띠고 있다.

강우량이 평년에 비해 다소 부족했던 1996년과 1997년에는 한강의 수위가 낮아져 자양취수장 흡수정의 수위도 낮게 유지되었으며, 강우량이 풍부했던 1998년에는

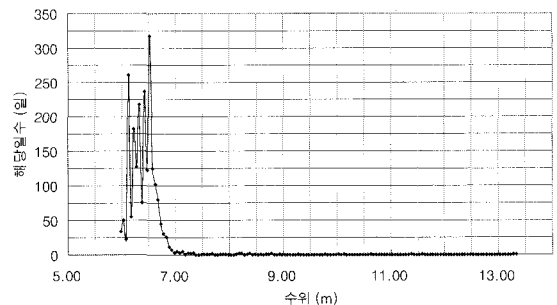


Fig. 3 Suction water levels of Jayang intake pumping station for 1993~1998

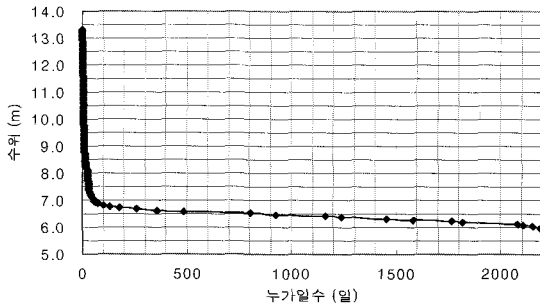


Fig. 4 Cumulative day vs. suction water level of Jayang intake pumping station for 1993~1998

흡수정의 수위가 높게 유지되어 운영된 것으로 판단된다. 이처럼 하천을 취수원으로 하는 펌프장은 강우량과 상류지역 수문의 방류량에 크게 의존하는데, 평균수위는 대체로 최고수위보다는 훨씬 아래에 그리고 최저수위에 가깝게 형성되므로 취수펌프의 캐비테이션 발생과 모래나 이물질 등의 침입에 대한 대책이 필요하다. 실제로 자양 취수펌프장 구내배관의 관중심은 8.7m이고, 누가일수에 의한 방법으로 1993년에서 1998년까지 6년 동안 흡수정에서 측정된 평균수위는 6.45m로 나타났다. 따라서 흡입배관을 통하여 와류(vortex) 등에 의한 공기의 혼입과 캐비테이션 현상이 발생하지 않도록 각별한 주의를 기울여 수도시설을 운영하여야 할 것으로 사료된다.

2.3.2 팔당 1 취수펌프장(1,2단계)

팔당 1 취수펌프장은 팔당댐 수위지에 연결되어 있어 수위가 비교적 안정적으로 유지 운영되는 시설물이다. 팔당 1 취수펌프장의 건설 당시 팔당댐의 상시만수위는 25.5m였고, 이용수심은 0.5m에 불과하였다. 이에 따라 흡수정의 저수위는 22.7m, 고수위는 23.2m로 계

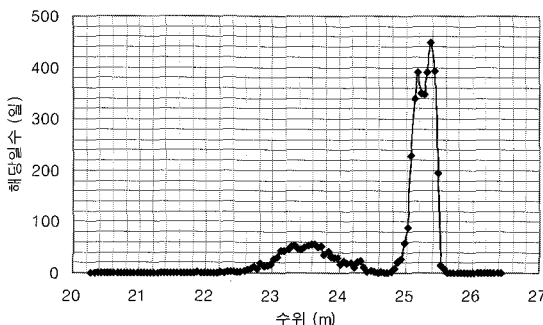


Fig. 5 Suction water levels of Paldang 1st intake pumping station for 1984~1998

획 설계되었다. Fig. 5는 1984년에서 1998년까지 15년 동안 팔당 1 취수펌프장의 흡수정에서 측정된 흡입수위에 대한 해당일수를 나타내었는데, 여기서 불충분하거나 통일되지 않은 자료는 제외시켰다. 수위에 대한 누가일수는 Fig. 6에 나타내었는데, 이 곡선은 하천의 수위(Fig. 4)와는 완전히 다른 특성을 보이고 있다. 즉, 하천의 수위는 저수위 근처에서 대부분 운영되는 반면 저수지의 수위는 고수위에 가깝게 유지되고 있음을 알 수 있다.

통계학적 방법으로 결정된 평균수위는 조사된 기간 동안의 수위에 대한 산술평균수위를 뜻하고, 저수위와 고수위의 중간 값에 해당된다. 실제로 통계학적 방법은 수위가 현격히 변하는 장소에서는 적용하기가 곤란하며, 조사된 기간이 짧거나 자료의 양이 적은 곳에 사용하는 것이 바람직하다. 한강이나 팔당댐에서 취수하는 펌프장의 경우 자료조사 기간이나 양이 충분하기 때문에 누가일수에 의한 방법으로 수위를 결정하는 것이 보다 합리적이며, 이들의 결과를 참조할 때 누가일수에 의한 방법이 통계학적 방법보다 운영수위의 폭을 넓게 산출하고 있으므로 취수펌프장의 안정적인 운영에도 더욱 유리할 것으로 판단된다.

2.4 펌프장의 토출수위

일반적으로 펌프의 용량 결정에 사용되는 토출수위는 계획수량이 통과하여 도달되어야 하는 수위로서 관로의 최고 정점부와 토출측 수조의 수위 중 높은 값을 적용한다. 본 장에서는 자양 취수펌프장과 팔당 1 취수펌프장(1,2단계)을 대상으로 앞장(펌프장의 흡입수위)에서 적용한 두 가지 방법 즉, 누가일수에 의한 방법과 통계학적 방법을 사용하여 합리적인 토출수위를 결정해 보고자 한다.

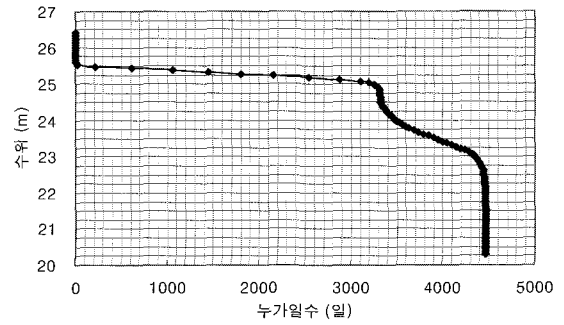


Fig. 6 Cumulative day vs. suction water level of Paldang 1st intake pumping station for 1984~1998

2.4.1 자양 취수펌프장

자양 취수장은 원수를 일산 정수장 착수정(gauging well)까지 도수하므로 취수펌프장의 토출수위는 착수정의 수위가 된다. 착수정은 2지로 구성되어 있으며, 1지의 규격은 폭4m×길이16m×높이4.5m로써 고수위는 25m로 계획 설계되었다. Fig. 7과 Fig. 8은 1998년 일년의 토출수위 변동을 각각 나타내었다. 착수정의 높이는 4.5m로 한정되어 있고 정수장내 구조물(혼화지, 침전지 등)의 수리조건은 제한적이기 때문에 토출수위는 연도에 상관없이 22~23m 범위에서 거의 일정하게 유지되어 운영되고 있음을 알 수 있다.

2.4.2 팔당 1 취수펌프장(1,2단계)

팔당 1 취수펌프장은 시설용량이 총 2,600천m<sup>3</sup>/일이며 서울특별시, 인천광역시 및 경기도 일원에 생활용수와 공업용수를 공급하기 위하여 1979년 완공되었다. 그런데 지방자치단체의 원수 수요량이 당초 계획설계용량에 미치지 못하여 도수관로내 마찰손실이 상당히 줄게 되었고, 이에 따라 취수펌프가 저양정·대유량으로 운전되는 악조건의 상황이 상당기간 지속되고 있는

실정이다. 도수터널 입구에는 조압수조(surge tank, 실제로는 stand pipe임)가 설치되어 있으며, 이 곳에서 피에조수두(piezometric head)가 72.84~81.30m 정도로 유지될 수 있도록 팔당 1 취수펌프장을 운영하도록 당초 설계시 계획되었다. 도수관로 하류 지역에 있는 정수장 착수정이나 가압장 흡수정의 수위가 조압수조의 피에조수두(심지어 위치수두)보다 훨씬 낮기 때문에 이곳의 피에조수두를 팔당 1 취수펌프장 토출수위의 개념(이하 STL이라 함)으로 생각할 수 있다. 즉, 당초 설계시 토출수조의 저수위는 72.84m, 고수위는 81.30m로 계획 설계된 것으로 볼 수 있다. Fig. 9는 1998년 한해 동안 STL에서 측정된 토출수위에 대한 해당일수를, Fig. 10은 토출수위에 대한 누가일수를 각각 나타내었다. 용수의 수요량이 큰 하절기와 적은 동절기에 STL을 각각 달리 운영·관리하고 있기 때문에 토출수위가 큰 폭으로 변하고 있음을 알 수 있다. 누가일수에 의한 평수위는 71.53m로써 당초 계획된 저수위보다 낮게 유지되어 운영되고 있는데, 이는 수도시설이 용수 수요의 감소로 인하여 일년 중 반 이상이 낮은 토출수위로 운영되고 있음을 의미한다.

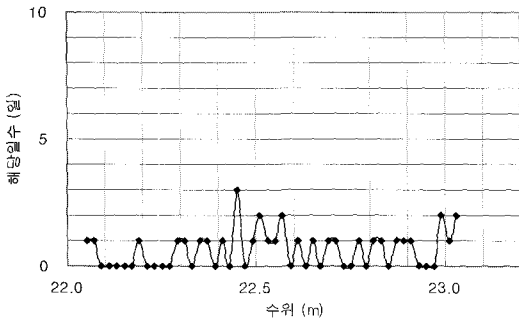


Fig. 7 Discharge water levels of Jayang intake pumping station in 1998

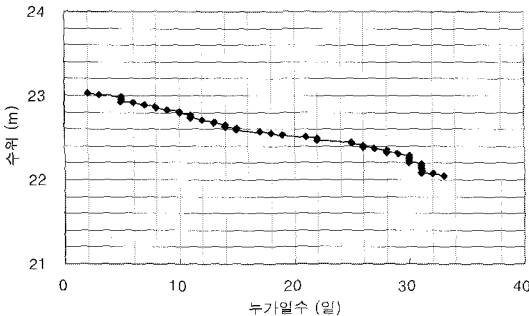


Fig. 8 Cumulative day vs. discharge water level of Jayang intake pumping station in 1998

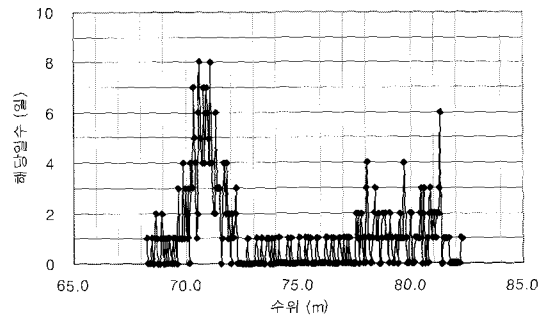


Fig. 9 Discharge water levels of Paldang 1st intake pumping station in 1998

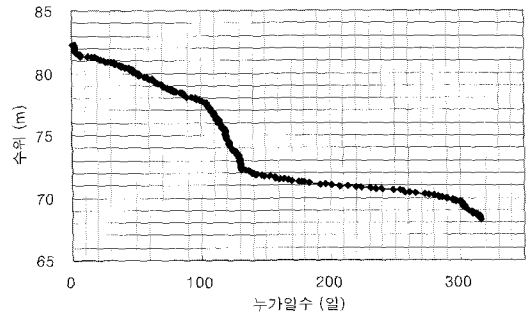


Fig. 10 Cumulative day vs. discharge water level of Paldang 1st intake pumping station in 1998

### 3. 손실양정의 적용방안

펌프의 전양정은 실양정과 손실양정을 고려하여 정하는 것이 일반적이며, 실양정은 펌프의 토출수위와 흡입수위와의 차이를 말하고, 손실양정은 펌프장 구내 배관손실과 흡입관로 및 토출관로의 손실수두로 나눌 수 있다. 펌프장 구내 배관손실로는 단관, 곡관, 이형관, 벨브류 등이 포함되고, 관수로(흡입, 토출관로)에서는 해젠·윌리엄스(Hazen-Williams) 공식이 널리 사용되는데, 이러한 손실양정  $h_e$  을 요약하면 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_e = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \Sigma K \frac{v^2}{2g} + 10.666 \frac{Q^{1.85} L}{C^{1.85} D^{4.87}} \quad (1)$$

펌프의 손실양정은 식(1)을 적용하여 계산할 수 있는데, 이는 얼마나 정확한  $f$ ,  $K$ ,  $C$  값들을 사용하느냐에 따라 그 성패가 달려있다고 해도 과언이 아니다.<sup>(8)</sup> 본 연구에서는 관로손실 변화에 대한 손실양정의 적용방안을 합리적으로 도출하기 위하여 펌프운영일지를 근거로 하여 평균적인 의미의 손실양정을 산출하는 방안에 대하여 제시하고자 한다. 흡·토출측 펌프구경 및 압력계기의 위치가 같다면 흡입·토출관로에서 발생하는 손실양정은 다음과 같다.

$$h_e = \frac{P_d - P_s}{\rho g} - h_a \quad (2)$$

펌프의 손실양정은 펌프 흡·토출측 압력수두차로부터 실양정을 뺀 값으로 산출할 수 있으며, 이를 앞장에서 검토한 자양 취수펌프장과 팔당 1 취수펌프장에 각각 적용해 보기로 한다.

#### 3.1 자양 취수펌프장

자양 취수펌프장은 1단계 시설용량인 150,000m<sup>3</sup>/일으로 완공되었으며, 1996.10. 2단계 사업 시설용량인 250,000m<sup>3</sup>/일으로 확장되었다. 이에 따라 현재 취수펌프장에는 아래와 같은 저양정 펌프와 고양정 펌프가 각각 3대씩 설치되어 운영되고 있다.

- 고양정 펌프(1,4,6호기) : Q=46.3m<sup>3</sup>/분, H=82m
- 저양정 펌프(2,3,5호기) : Q=65.0m<sup>3</sup>/분, H=55m

Table 1 Mean head loss of Jayang intake pumping station in 1998

운영자료	흡입MWL (m)	토출MWL (m)	실양정 (m)	운전양정 (m)	손실양정 (m)
통 계	6.72	22.61	15.89	61.54	45.65
누가일수	6.60	22.57	15.97		45.57

Table 1은 누가일수와 통계학적 방법의 실양정에 따른 평균손실양정을 각각 나타내었다. 자양 취수장에는 저양정 펌프와 고양정 펌프가 동시에 병렬로 운전되는 경우가 있기 때문에 취수펌프의 평균운전양정은 호기별 가동시간을 기준으로 가중치를 주어 산출하였다. 한편, 자양 취수펌프장은 2단계 시설기준(Q=250,000m<sup>3</sup>/일)으로 살펴볼 때 정격양정이 82m, 계획실양정이 19m(=토출HWL-흡입LWL=25-6), 여유치를 포함한 손실양정이 63m(=82-19)로 당초 계획되었는데, 펌프정격양정 중 손실양정은 실양정에 비해 매우 큰 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 이는 자양 취수장으로부터 일산 정수장까지의 도수관로 길이가 35.4km로 상당히 길고, 1,500mm 관내 유속이 1.64m/s로 비교적 빠르게 설계되었기 때문이다. 또한, 자양 취수펌프장 구내 흡입배관 및 토출배관에는 유량차단용 벨브로서 800mm와 700mm 제수벨브가 각각 설치되어 있고, 고양정 펌프의 정격유량을 기준으로 한 흡입벨브와 토출벨브내 유속은 각각 1.54m/s와 2.01m/s이며, 저양정 펌프의 정격유량을 기준으로 한 경우 유속은 2.16m/s와 2.81m/s이다. 취수펌프의 운전시 제수벨브는 완전히 개방된 채 운영되므로 이곳에서 수두손실은 매우 적은 것으로 생각된다. 펌프의 손실양정은 대부분 도수관로의 손실수두에 기인되므로 관로 시설을 최상의 조건으로 유지하여 에너지 사용을 줄일 수 있도록 유지관리에 만전을 기할 필요가 있다.

#### 3.2 팔당 1 취수펌프장(1, 2단계)

Table 2는 누가일수와 통계학적 방법의 실양정에 따른 펌프의 평균손실양정을 각각 나타내었는데, 1998년 일년 동안 팔당 1 취수펌프장(1, 2단계)의 평균손실양

Table 2 Mean head loss of Paldang 1st intake pumping station in 1998

운영자료	흡입MWL (m)	토출MWL (m)	실양정 (m)	운전양정 (m)	손실양정 (m)
통 계	23.92	74.11	50.19	58.59	8.40
누가일수	23.91	71.53	47.62		10.97

정은 8.40~10.97m 정도였음을 알 수 있다. 이는 취수 펌프의 정격양정이 65m, 계획실양정이 58.6m(=토출 HWL-흡입LWL=81.3-22.7), 여유치를 포함한 손실양정이 6.4m(=65-58.6)로 당초 계획되었고, 설계시 관경이나 관로손실은 15~20년 후를 고려하여 결정되고 있음을 감안할 때 예상보다 훨씬 큰 손실양정인 것으로 사료된다. 운영자료로부터 산출된 평균손실양정이 당초 계획된 손실양정보다 상당히 크다는 사실은 펌프 토출측 밸브가 과도하게 교축되어 운전되거나 시스템상에서 관로손실이 크게 발생하고 있음을 의미하며, 이는 또한 에너지 낭비를 초래하는 주요 원인으로 작용한다. 팔당 1 취수펌프장 구내 흡입배관 및 토출배관에는 유량차단용 밸브로서 900mm와 800mm 진동 버티플라이밸브가 각각 설치되어 있는데, 버티플라이밸브는 구조 특성상 밸브디스크가 유로 중에 존재하기 때문에 유동의 손실을 초래하고 완벽한 차수효과를 기대하기가 어렵다. 일반적으로 버티플라이밸브는 유량 조절 목적으로 사용되며, 차단용으로는 수도용 계수밸브(slucice valve)를 사용하는 것이 바람직하다. 또한, 취수펌프의 정격유량을 기준으로 한 흡입밸브와 토출밸브내 유속은 각각 3.67 m/s와 4.64m/s로 다소 빠른 편이며, 손실양정이 유속의 제곱에 비례한다는 사실에 비추어 볼 때 펌프장 구내 배관손실은 상당히 크게 발생할 것을 쉽게 짐작할 수 있다.

#### 4. 시스템 저항곡선

손실양정은 앞장에서 설명한 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 수도시설에서 관내 유동은 대부분 난류이기 때문에 손실은 근사적으로 유속(또는 유량)의 제곱에 비례한다고 볼 수 있다. 그러나 엄밀히 말하면 Hazen-Willsiams 공식에서 손실은 Q<sup>2</sup>이 아닌 Q<sup>1.85</sup>에 비례하고, Darcy-Weisbach 공식과 부차적 손실 계산에 사용되는 f와 K는 둘 다 레이놀즈수의 함수로 표시되나, 펌프-관로계에서 관로저항곡선은 일반적으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$H = h_a + R Q^2 \tag{3}$$

펌프의 운전점은 관로저항곡선과 펌프양정-유량곡선이 만나는 점에서 형성되고, 관로에서 발생하는 손실은 용수 공급량이 변함에 따라 달라지는데, 관로손실은 유량의 제곱에 비례하여 증가한다. 관로저항곡선의 상수(이하 저항계수라 함), R은 시스템에 따라 고유

한 값을 갖으며 작을수록 좋다. 또한, 저항계수 R은 펌프장이나 관로에서 밸브 등을 인위적으로 조작하지 않는다면 통수년수의 경과에 따라서 점차로 증가하는 특성을 갖는다. 본 장에서는 앞에서 검토된 자양 취수펌프장과 팔당 1 취수펌프장의 운영자료를 토대로 저항계수 R을 산출하고, 용수 공급량이 변하였을 때 펌프의 양정을 적용시키는 방안에 대하여 제시해 보고자 한다.

#### 4.1 자양 취수펌프장

선행연구결과(기초자료조사 중 취수·송수량 변화특성조사)에 따르면 자양 취수펌프장의 취수량은 1992년이 후 연차적으로 계속 증가하는 추세로 나타났는데, 1998년도 연평균 취수량은 170,081m<sup>3</sup>/일인 것으로 조사되었다. 자양 취수펌프장의 손실양정은 앞장에서 검토한 바와 같이 운영자료로부터 산출되었으며, 누가일수와 통계학적 방법에 따른 시스템 저항계수 R은 Table 3에 나타내었다. 또한 Fig. 11은 누가곡선에 의한 방법으로 얻어진 실양정을 기준으로 한 1996~1998년 관로저항곡선을 각각 나타내었다. 1단계 시설은 1996.10.에 2단계 용량으로 확장되었기 때문에 1996년과 1997년은 과도기적인 특성을 나타내고 있으나, 1998년에는 비교적 안정화된 경향을 보이고 있다. 즉, 취수펌프가 교체된 이듬해(1997년)에는 용수 수요량에 따라 저양정 펌프(Q=65.0m<sup>3</sup>/분, H=55m)와 고양정 펌프(Q=46.3m<sup>3</sup>/분, H=82m)를 교대로 운영한 것으로 보이며, 1998년에는 운영 방식을 바꾸어 저양정 펌프를 상시 가동하고 4호기4호기 고양정 펌프 1대를 조절용으로 사용한 것으로 추정된다.

일반적으로 저항계수 R은 도수량이 일정하다면 관로시설의 통수년수에 따라 점차로 증가하고, 밸브를 과도하게 교축 운영하는 경우에도 커지는 특성이 있다. 따라서 수도시설을 운영하는 기간 동안 R값을 계속 기록 관리한다면 관로의 노후화 정도를 정량적으로 판단할 수 있으며, 용수 공급량이 변하는 경우에도 필요로 하는 펌프양정을 적절히 산출해 낼 수 있다. 자양 취수장의 저항계수 R은 1998년 현재 11.8 정도이므로 도수량이 200,000m<sup>3</sup>/일로 증가하는 경우 취수펌프의 양

Table 3 Constant of system total-head curve for Jayang intake pumping station in 1998

	손실양정(m)	도수유량(m <sup>3</sup> /s)	저항계수R
통 계	45.65	1.969	11.78
누가일수	45.57		11.76

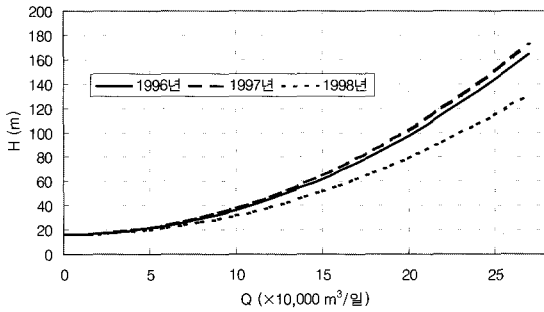


Fig. 11 System total-head curves of Jayang intake pumping station for 1996~1998

정은 누가일수에 의한 방법으로 아래와 같이 계산할 수 있으며, 약 79m일 것으로 예상된다. 이는 고양정 펌프 3대가 운전될 때의 취수량이므로, 그 이상의 용수가 필요한 경우에는 저양정 펌프를 고양정 펌프로 대체시켜야 할 것으로 판단된다.

$$H = h_a + RQ^2 = 15.97 + 11.76 \times \left(\frac{200000}{86400}\right)^2 = 15.97 + 63.01 = 78.98 \text{ m}$$

#### 4.2 팔당 1 취수펌프장(1, 2단계)

수도권 광역상수도사업이 현재 5단계까지 완공됨에 따라 수도권 관로망은 상호 연계되어 운영되고 있으며, 이에 따라 노후화가 가장 심한 1,2단계 수도시설의 이용률은 점차 감소하는 추세에 있다. 기초자료조사 중 취수·송수량 변화특성 조사결과에 따르면 팔당 1 취수펌프장은 1989년부터 취수량이 감소하는 것으로 나타났으며, 1998년 한해 동안 평균 도수유량은 1,672,100 m³/일인 것으로 조사되었다. 팔당 1 취수펌프장의 손실양정은 앞장에서 검토한 바와 같이 운영자료로부터 산출되었으며, 누가일수와 통계학적 방법에 따른 시스템 저항계수 R은 Table 4에 나타내었다. 또한 Fig. 12는 누가곡선에 의한 관로저항곡선을 각각 나타내었다. 팔당 1 취수장의 누가곡선에 의한 저항계수 R은 1998년 현재 0.0293이므로 도수량이 2단계 용량인 1,400,000m³/

Table 4 Constant of system total-head curve for Paldang 1st intake pumping station in 1998

	손실양정(m)	도수유량(m³/s)	저항계수R
봉 계	8.40	19.353	0.022428
누가일수	10.97		0.029289

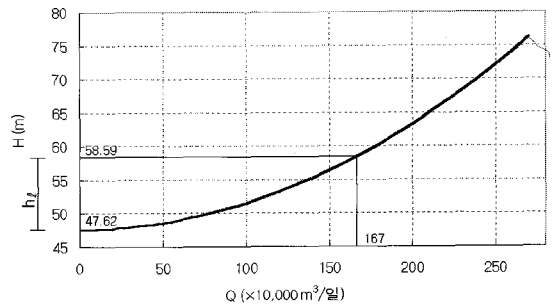


Fig. 12 System total-head curve of Paldang 1st intake pumping station in 1998

일으로 감소하는 경우 취수펌프의 양정은 아래와 같이 계산할 수 있으며, 약 55.3m로 예측할 수 있다.

$$H = h_a + RQ^2 = 47.62 + 0.029289 \times \left(\frac{1400000}{86400}\right)^2 = 47.62 + 7.69 = 55.31 \text{ m}$$

#### 5. 결 론

본 연구에서는 하천을 수원으로 하는 자양 취수펌프장과 저수지수를 취수하는 팔당 1취수펌프장에 대하여 운영일지를 토대로 누가일수에 의한 방법과 통계학적 방법을 각각 사용하여 펌프의 흡입·토출수위와 손실양정 그리고 시스템 저항계수 등을 결정하는 방안을 제시한 후 안정적인 용수 공급과 경제적인 펌프 운영이 동시에 이루어질 수 있는 대책을 마련하였으며, 상수도 시설기준에 적용될 수 있는 펌프의 실양정 및 손실양정 결정을 위한 기준안을 아래와 같이 제안하고자 한다.

- (1) 하천의 수위는 누가일수를 기준으로 결정되는데, 평균수위는 대체로 최고수위보다는 훨씬 아래에 그리고 최저수위에 가깝게 형성되기 때문에 안정적인 용수 공급을 목표로 하는 광역상수도에서 취수펌프장 흡수정의 저수위는 하천시설기준에서 정의된 저수위로 설정하기보다는 1년 중에서 355일 이상 유지될 수 있는 갈수위로서 정하는 것이 바람직하다. 또한, 평수위가 낮은 관계로 펌프 흡입배관을 통하여 공기나 모래 등의 이물질이 유입되지 않도록 대책을 세우고, 특히 취수펌프의 캐비테이션 발생 여부는 반드시 흡수정의 저수위를 기준으로 검토하여야 하며, 유효흡입수두(NPSH)에 충분한 여유를 두어 펌프의 전 운전 범위에 걸쳐 캐비테이션

이 발생하지 않도록 각별히 주의하여야만 한다.

- (2) 저수지의 활용용량은 저수위로부터 상시만수위까지의 저수공간을 말하며 댐의 계획건설 당시 이미 결정되는 사항이다. 그러나 실제로 운영관리가 실시되는 팔당댐과 같은 경우 빈도가 가장 큰 평균 수위는 상시만수위에 가깝게 유지되므로 저수지를 수원으로 하여 취수하는 펌프장에서 저수위, 평수위, 고수위 등은 누가일수나 통계학적 방법에 의해 합리적으로 결정할 필요가 있다. 취수펌프의 실양정은 이러한 방법으로 산출된 저수위를 기준으로 결정하는데, 누가일수에 의한 방법이 통계학적 방법보다 운영수위의 폭을 넓게 산출하므로 취수펌프의 안정적인 운영에도 더욱 유리할 것으로 판단된다.
- (3) 펌프가 정수장의 착수정이나 배수지 등과 같이 수리구조물로 물을 공급하는 경우 토출수위는 거의 일정한 범위에서 운영되므로 펌프의 실양정은 고수위를 기준으로 결정한다. 또한, 관로 도중에 그 위치가 토출수위보다 높은 정점부가 존재하는 경우 이곳에는 조압수조나 조절지 또는 공기밸브 등이 보편적으로 설치되는데, 이 때 펌프 실양정은 관로 정점부에서의 피에조수두를 기준으로 결정한다. 이러한 경우 관로 정점부에서의 피에조수두는 용수 수요량에 따라 큰 폭으로 변동될 수 있으므로 이에 대한 대책으로서 고양정 펌프와 저양정 펌프를 병용하여 사용하는 방안 등을 적극적으로 검토하도록 한다.
- (4) 도·송수관로가 길어 펌프의 실양정보다 손실양정의 비중이 큰 경우 펌프의 정격양정은 단계별 시설용량에 따라서 현격히 변하게 된다. 또한, 관경이나 관로손실이 계획설계시 15~20년 후를 고려하여 결정되고 있음을 감안할 때 펌프의 손실양정은 흔히 과다하게 선정되어 에너지 낭비와 펌프의 수명단축을 초래하는 주원인으로 작용하고 있다. 그러므로 헤젠·윌리엄스 공식에 사용되는 유속계수 C는 수도시설의 통수년수 경과에 따라서 단계별로 적절한 값을 적용하고, 펌프의 전양정은 시설용량이나 통수년수에 따라 서로 다른 시방으로 결정하는 방안을 적극 검토하도록 한다. 관로손실이 큰 시스템에서는 펌프를 회전수 제어방식으로 운영할 때 에너지 절감 효과를 상당히 기대할 수 있기 때문에 향후 이와 같은 펌프장의 계획 설계시 다른 설계 방안과 경제성을 비교 분석한 후 이를 적극 도입하는 것이 바람직하다.
- (5) 펌프장 구내 흡입배관 및 토출배관의 유량차단용 밸

브로는 버터플라이밸브보다 수도용 제수밸브를 사용하는 것이 바람직하다. 또한, 펌프의 정격유량을 기준으로 흡입배관과 토출배관내 유속은 각각 1.0~2.0m/s 와 2.0~3.0m/s 정도로 설계하여, 기계설비의 수명을 늘리고 구내 배관손실을 줄일 수 있도록 한다.

- (6) 최악의 조건 즉, 노후화 된 관로조건, 피크시의 유량 공급, 실양정을 저수위부터 고수위까지 적용 등으로 선정된 펌프의 전양정에는 여유량이 상당히 포함되어 실제로 펌프가 저양정·대유량으로 운전되는 경우가 많다. 따라서 계획설계시 펌프의 최고 효율점은 정격 유량의 105~110% 사이에 위치하도록 하여, 평균 운전점이 최고 효율점 근처에서 형성될 수 있도록 한다.
- (7) 펌프의 운전점은 관로저항곡선과 펌프양정-유량곡선이 만나는 점에서 형성되는데, 관로저항곡선의 상수(또는 저항계수) R은 시스템에 따라 고유한 값을 갖으며 작을수록 좋다. 수도시설을 운영하는 기간 동안 경제성을 나타내는 원단위전력량(kWh/m<sup>3</sup>)과 마찬가지로 저항계수 R값을 계속 기록 관리한다면 관로의 노후화 정도를 정량적으로 판단할 수 있으며, 용수 공급량이 변하는 경우에도 필요로 하는 펌프양정을 적절히 산출해 낼 수 있는 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 한국수자원공사 수도설비처의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 환경부, 1997, 상수도 시설기준, 한국수도협회.
- (2) 日本水道協會, 2000, 수도시설 설계지침.
- (3) 건설부, 1990, 수도권 3단계 광역상수도 공사지.
- (4) 건설부, 1990, "수도권 광역상수도 4단계 사업," 실시설계 보고서.
- (5) 한국수자원공사, 1995, "수도권 광역상수도 5단계 사업," 실시설계 보고서.
- (6) 건설부, 1993, 하천 시설기준
- (7) 건설부, 1993, 댐 시설기준
- (8) Sanks, R. L., 1998, Pumping Station Design, 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- (9) Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P. and Heald, C. C., 2001, Pump Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill.