

사천정수장 송수펌프의 운영방안에 관한 연구

김경엽* · 김보승** · 라병필** · 김종수***

1. 서 론

남강계통 I 단계 광역상수도는 진양호를 수원으로 하여 사천시, 통영시, 고성군 등 경상남도 남부지역에 용수를 공급하는 시설로서 1989년에 통수되었다. 또한, 남강댐 계통 광역상수도 II 단계 사업은 서부 경상남도 지역인 통영시, 거제시, 사천시, 진주시, 고성군, 하동군 및 남해군 일대에 급증하는 생활용수, 공업용수 및 관 광용수의 장래 수요에 원활히 대처하기 위하여 남강댐 을 수원으로 하는 I 단계 사업에 이어서 2003년 준공 되었다. II 단계 사업은 정수장에서 생산된 용수를 고 양정과 저양정 송수펌프를 통하여 공급할 수 있도록 계획되었는데, 고양정의 송수펌프는 통영·거제계통과 진주계통으로 펌핑하며, 저양정 송수펌프는 삼천포· 남해계통과 하동계통을 담당한다. 본 연구에서는 남강 계통 I 단계 시설 중 삼천포계통의 송수펌프실을 대 상으로 그 동안 수집된 자료^{(1)~(4)} 및 다년간의 정수장 운영일지를 조사·분석한 후 송수펌프를 보다 안정적 이면서 경제적으로 운영할 수 있는 방안을 모색하고자 한다. 또한, 2003년 말 통수된 남강댐 계통 광역상수도 II 단계 사업 중 저양정 계통 즉, 삼천포·남해계통과 하동계통으로 용수를 공급하는 송수펌프에 대한 경제 적인 운영방안을 검토하고자 한다.

2. 남강계통 I 단계 광역상수도

2.1 삼천포계통 시스템 구성

남강계통 I 단계 광역상수도 사업의 주요 연혁은 다음과 같고, 그림 1은 사천 정수장에 위치한 송수펌프실의 내부 전경을 나타내었다.

* 한국산업기술대학교 기계공학과

** 한국수자원공사

*** (주)덕지산업

E-mail : kykim@kpu.ac.kr



그림 1 남강계통 I 단계 광역상수도 송수펌프실 전경

- 1) 조사 설계 : 1984.3~1985.9
- 2) 시설 공사
 - 남강 취수장 : 1988.5.13~1989.5.27
 - 사천 정수장 : 1985.12.30~1989.5.27
(I 단계 확장) 1995.9.2~1996.12.27
 - 관 로 : 1986.7.23~1989.5.20
- 3) 통수 개시일 (I 단계 확장) : 1989.5.15 (1997.1.1)
- 4) 관리권 출자 : 1990.12.19 (14,611백만원)

그림 2는 남강계통 I 단계 광역상수도의 수리계통도 를 나타내었는데, 삼천포계통 관로는 정수장 송수펌프 실에서 경남 사천시 용강동 용강정수장 앞까지 정수를 공급하는 압송 관로로 도중에 사천읍을 비롯한 지자체 수수처에 용수를 공급하는 관로가 분기되어 있다. 그림 3은 삼천포계통 송수관로망 (transmission pipeline networks)을, 그림 4는 송수펌프실에서 용강 배수지까 지의 관로형상 (pipeline profile)을 각각 나타내었다. 송수펌프실에서 용강 배수지까지의 송수관로 길이는 약 19.3 km이고, 관경은 700 mm이다. 일평균 계획설 계유량인 37,070 m³/d의 용수를 공급하기 위해서는 양 쪽흡입 원심펌프 3대가 병렬로 운전되는데, 이 때 수수

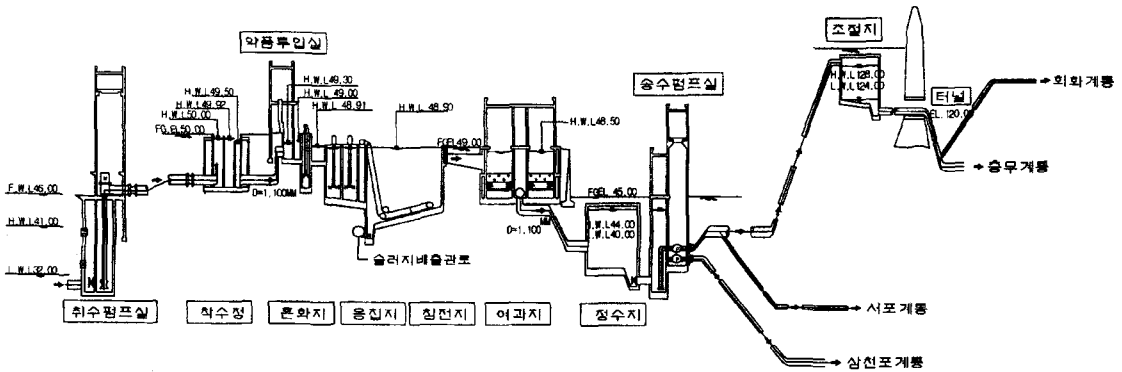


그림 2 남강계통 1 단계 광역상수도 수리계통도

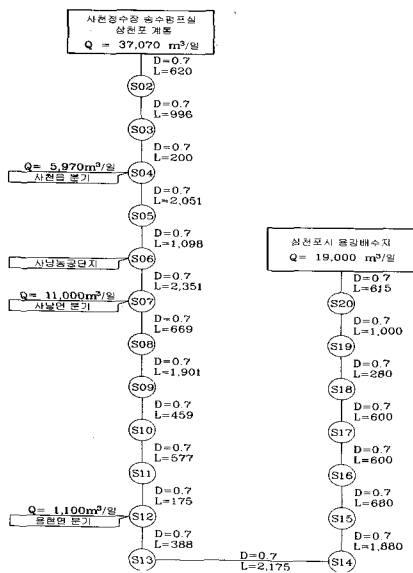


그림 3 삼천포 계통 관망도 (1 단계)

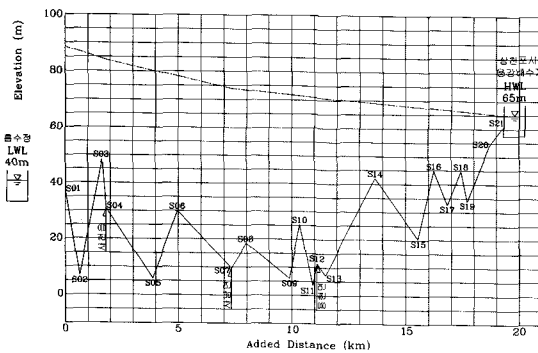


그림 4 삼천포 계통 수리증단도 (1 단계)

표 1 수수지역 배수지 수위 및 수리계산

주요 지점 Node	정상상태 동수구배선 (HGL, m)	수수지역 배수지 고수위 (HWL, m)
삼천포계통 펌프장 S01	88.49	사천정수장 정수지 44.0
사천읍 분기 S04	83.95	사천읍 배수지 59.5
사남농공단지 분기 S06	78.26	사남, 진사 배수지 45.0, 49.0
사남면 분기 S07	74.00	사남면 배수지 64.84
용현면 분기 S12	70.95	용현면 배수지 54.0
용강 배수지 S21	65.00	용강 배수지 65.0

지역으로 분기되는 지점에서의 동수구배선 (Hydraulic Grade Line; HGL)과 배수지의 고수위 (High Water Level; HWL)를 표 1에 나타내었다. 여기서, Hazen-Williams (Hazen-Williams) 공식에 사용되는 유속계수, C는 노후된 관의 정도를 고려하여 100을 사용하였다. 정수지가 저수위 (Low Water Level; LWL)의 상태일 때 계획설계유량을 공급하기 위해서는 송수펌프의 전양정 (total head, H_p)은 아래와 같이 결정된다.

$$H_p = HGL - LWL + H_\ell = 88.49 - 40 + 1.5 \approx 50 \text{ m}$$

여기서,

HGL : 송수펌프실 출구에서의 동수구배선 (m)

LWL : 흡수정의 저수위 (m)

H_ℓ : 송수펌프실의 구내 배관손실 (m)

이와 같은 방법으로 결정된 삼천포계통 1 단계 송수펌프의 현황을 표 2에 나타내었다.

표 2 삼천포계통 1단계 송수펌프 현황

시설 용량 (m ³ /d)	호기	펌프		모터		펌프 형식	제작사
		유량 (m ³ /h)	양정 (m)	동력 (kW/hp)	극수 (P)		
37,070	#1, 3	516	50	150(200)	4	양쪽흡입 원심펌프	효성
	#4, 5	516	50	110(150)	4	양쪽흡입 원심펌프	효성
	#2	402	50	95(130)	4	한쪽흡입 원심펌프	효성

주) 상용 : 주펌프 3대

2.2 삼천포계통 운영자료분석

최근 5년 동안 삼천포계통의 송수펌프실을 통하여 공급된 용수량 현황을 표 3에 나타내었다. 연평균 23,186 m³/d의 용수가 공급되어 당초 계획설계용량의 62.5% 정도가 펌핑된 것으로 조사되었다. 표 4는 2003년 7월 21일 현재 운영 배분량을 나타내었는데, 전체 배분량 계획이 22,404 m³/d로써 그다지 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이러한 상황에서 삼천포 계통 송수펌프의 운전현황을 조사하기 위하여 사천권 관리단에서 제공한 반년 (2001.2~2001.7)동안의 정수장 운영일지를 토대로 송수펌프 1~5호기의 평균운전시간을 분석한 후 그 결과를 표 5에 요약하여 나타내었다. 앞의 표 2에서 설명한 바와 같이 주펌프 (large pump) 4대 중 1대는 예비용이며, 2호기는 조절용 펌프 (small pump)로 계획·설치되었다. 분석결과를 살펴보면 주펌프 중 4호기는 일평균 20시간 이상 운전되고 있는 반면, 5호기는 1시간도 채 운전되지 않고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 조절펌프인 2호기는 일평균 11시간 이상 운전되어 상당한 운영부하 (operation load)가 걸리고 있는 것으로 나타났다.

삼천포계통 송수펌프의 운전현황을 보다 세밀히 조사하기 위하여 일주일 동안 연속적으로 송수펌프를 운영한 실적을 시간대별로 정리하여 그림 5에 나타내었다. 주펌프 1호기는 일주일에 한 번 5시간 50분 동안 운전되었으며, 5호기는 전혀 운전되지 않은 반면에, 4호기는 금요일부터 다음 주 월요일까지 72시간 동안 연속 운전된 것으로 기록되었다. 주펌프 3호기와 조절펌프 2호기는 용수공급량과 수요량의 균형을 맞추기 위하여 하루에 한차례 이상씩 기동·정지 (on/off)된 것으로 나타났다. 또한, 용수의 수요가 증가하는 아침 7시부터 저녁 8시까지의 시간대에는 2, 3, 4호기 펌프

표 3 최근 5년간 삼천포계통 용수공급현황

년도	1998	1999	2000	2001	2002	연평균
공급량 (m ³ /d)	23,200	21,630	26,034	23,947	21,120	23,186

표 4 삼천포계통 용수배분계획 및 배분량

수용가	배분계획량 (m ³ /d)	운영배분량 (m ³ /d)	배분개시일
삼천포(용강)	19,000	7,400	2003.7.21 배분량 변경
죽림지구		1,800	"
사천읍	5,970	9,000	"
용현면	1,100	400	"
사남면	11,000	800	"
진사농공단지		2,300	"
사남농공단지		700	2001.12.1 배분량 변경
수자원공사(속소)		4	2000.3.1 급수 개시
계	37,070	22,404	

주) 2003.7.21 현재

표 5 삼천포계통 1단계 송수펌프의 반년간 운전현황

	1호기	2호기	3호기	4호기	5호기
2001.2	4:20	405:20	368:40	667:10	4:40
2001.3	237:50	369:20	136:10	601:20	142:40
2001.4	20:20	354:30	298:10	680:30	0:00
2001.5	289:20	319:50	118:20	743:30	0:00
2001.6	189:50	254:35	228:30	682:00	0:10
2001.7	207:40	400:40	532:20	356:50	1:30
반년간 운전시간	949:20	2104:15	1682:10	3731:20	149:00
일평균 운전시간	5:15	11:38	9:18	20:37	0:49

주) Large pump : 1, 3, 4, 5호기
Small pump : 2호기

3대로 병렬운전하는 경우가 많았고, 용수 수요가 감소하는 심야 시간대에는 펌프 1대만을 운영하였다. 이러한 운영 방법은 수년간의 펌프장 운영실적 및 운전자의 경험을 바탕으로 이루어지고 있는 것으로 판단된다. 한편, 사천권 관리단에서는 충무계통과 삼천포계통의 송수펌프를 구동하는데 소요된 전력량을 따로 기록하지 않고, 두 계통으로 공급된 정수에 대한 전력원단위

송수 펌프		2001.7.25(수) 현재 시간												운전 시간
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
1호기														0:00
2호기														13:50
3호기														20:50
4호기														0:00
5호기														

송수 펌프		2001.7.26(목) 현재 시간												운전 시간
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
1호기														0:00
2호기														18:00
3호기														14:20
4호기														20:30
5호기														0:00

송수 펌프		2001.7.27(금) 현재 시간												운전 시간
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
1호기														0:00
2호기														21:00
3호기														12:30
4호기														18:00
5호기														0:00

송수 펌프		2001.7.28(토) 현재 시간												운전 시간
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
1호기														0:00
2호기														10:00
3호기														15:20
4호기														24:00
5호기														0:00

송수 펌프		2001.7.29(일) 현재 시간												운전 시간
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
1호기														5:50
2호기														10:00
3호기														7:30
4호기														24:00
5호기														0:00

송수 펌프		2001.7.30(월) 현재 시간												운전 시간
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
1호기														0:00
2호기														13:20
3호기														15:00
4호기														20:30
5호기														0:00

송수 펌프		2001.7.31(화) 현재 시간												운전 시간
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
1호기														0:00
2호기														14:50
3호기														13:00
4호기														23:50
5호기														0:00

그림 5 삼천포계통 1 단계 송수펌프의 일주간 운전현황

를 통합·관리해 왔다. 이에 따라 삼천포계통의 송수 펌프장에 대한 전력원단위를 별도로 산출하기가 매우 어려웠다. 또한, 지자체에서 관리하고 있는 배수지들의 수위나 유입밸브의 운영에 관한 자료가 확보되어 있지 않아서 시스템 저항곡선을 추정하기도 곤란한 상황이었다. 따라서, 본 연구에서는 삼천포 계통으로의 용수 공급량과 송수펌프의 운전일지 등을 토대로 현재 관리 단에서 운영하고 있는 방식보다 안정적이고 경제적인 운영방안을 제시하고자 한다.

2.3 삼천포계통 송수펌프실의 개선 제안사항

2.3.1 병렬운전대수에 의한 유량제어

병렬운전대수에 의한 유량제어는 그림 6에 나타난 바와 같이 운전대수의 변경에 의해 유량을 제어하는 방식이다. 이는 제어방법이 간단하고 대부분할에 의하여 위험을 분산시킬 수 있지만, 제어량이 단계적으로 된다. 흡입 또는 토출수면의 수위와 연동하여 운전대수를 제어하는 자동운전인 경우에는 수위의 변동이 심하면 기동·정지를 몇 번씩 반복하는 헌팅 (hunting) 현상이 발생하는 경우도 있다. 이러한 경우 전동기의 과열이나 밸브와 기동기의 소모가 심하고 기기의 수명을 현저히 저하시킬 우려가 있기 때문에 계획할 때에는 수면 면적과 펌프 1대 당의 용량과의 비가 지나치게 작아지지 않도록 주의해야 한다. 운전대수의 자동 제어는 각 펌프의 운전시간을 평균화하기 위해서 예비기를 포함한 전 호기를 대상으로 순차적으로 운전할 수 있도록 한다. 정전 후 전원이 복구되었을 때에는 1대씩 순차적으로 기동시키기 위하여 동시기동 방지회로를 설치해야 하며, 운전 중인 기기의 고장에 의해

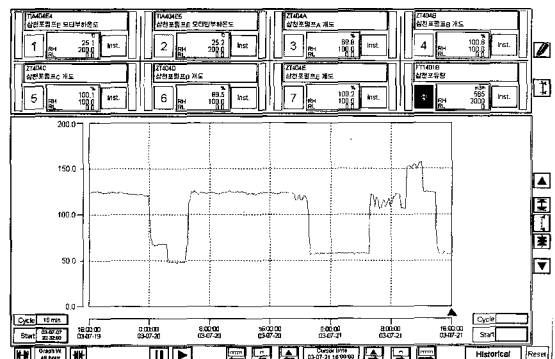


그림 6 삼천포계통 1 단계 운전대수제어

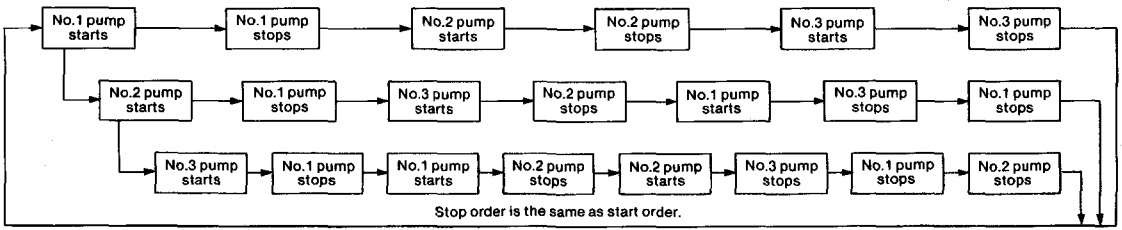


그림 7 펌프 3대 병렬 및 교대 운전 방법

펌프가 정지되었을 경우에는 다른 호기를 자동으로 기동시키는 회로를 설치해야 한다. 또한, 운전지령계의 고장시에 예비기를 포함한 전 대수가 운전됨으로써 계약전력을 초과하는 일이 생기지 않도록 인터록(interlock) 회로를 설치해야 한다.

2.3.2 송수펌프의 교대 운전

삼천포계통 I 단계 운영자료분석에서 검토한 바와 같이 주 펌프들 중 5호기는 운영실적이 매우 저조한 것으로 나타났는데, 이는 토출배관에 설치되어 있는 체크밸브의 상태가 불안정하여 운전자가 5호기의 사용을 꺼리고 있기 때문인 것으로 사료된다. 본 시스템과 같이 펌프의 병렬운전대수로 공급유량을 조절하는 경우 모든 펌프의 운전 시간은 가급적 동일하게 운영하는 것이 바람직하며, 송수펌프는 교대로 운전될 수 있도록 계획하는 것이 합리적이다. 이렇게 함으로써 각 펌프의 부하를 줄여 기계의 수명을 더욱 늘일 수 있고, 기기의 고장 발생을 조기에 발견·조치할 수 있다. 또한, 조절용 펌프인 2호기는 한쪽흡입 원심펌프로써 주 펌프와는 성능이 완전히 다르기 때문에 가능한 한 동일한 성능을 갖고 있는 주 펌프들 (large pumps)로 용수를 공급하는 것이 좋다. 펌프 3대가 병렬로 설치되어 교대로 운전되는 (three pumps parallel/alternate operation) 전형적인 시퀀스를 그림 7에 나타내었는데, 이를 참고하여 운영계획을 수립하도록 제안한다.

2.3.3 압력제어방식에 의한 자동운전

삼천포 계통 송수펌프실의 에어챔버 (air chamber)는 수격완화설비의 기능보다는 주야간 또는 시간대별로 용수 수요량이 변동됨에 따른 펌프의 경제적 운영을 위한 급수탱크 (water tank, pressure tank, hydrophore tank, accumulator)의 개념으로 당초 설계

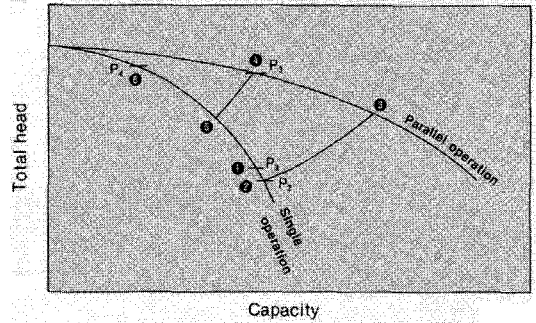


그림 8 압력 제어 시스템

시 그 용량이 결정되었다. 그러나 현재 관리단에서는 이를 단순히 수동 조작에 의한 수격완화설비로서만 활용하고 있는 실정이므로, 이는 당초 계획대로 에너지 절감을 위한 급수탱크의 용도로 전환할 필요가 있다. 이를 위해서는 그 동안 기록 관리해온 펌프운영일지를 토대로 적절한 제어 압력들을 결정한 후 자동 운전에 의한 펌프의 운영이 이루어질 수 있도록 제어설비에 대한 보완 대책이 뒤따라야 할 것으로 판단된다. 압력 제어방식에 의한 자동운전을 위한 전형적인 펌프운전 대수 결정방법을 그림 8에 나타내었는데, 제어 시퀀스 (control sequence)는 다음과 같다.

- 1) 급수탱크에 물이 충분히 차 있는 경우 모든 펌프는 정지해 있다. 이러한 경우 용수는 압력탱크로부터 공급되며, 탱크 내 수압은 점차 떨어지게 된다.
- 2) 탱크 내 압력이 P_1 (점 ①)까지 떨어지면 첫 번째 펌프가 운전되고, 용수는 가동된 펌프와 탱크로부터 공급된다.
- 3) 많은 물이 소비되는 경우 수압은 P_2 (점 ②)까지 계속 떨어지고, 두 번째 펌프가 기동된다. 이 때 펌프의 운전점은 병렬 운전점인 ③에서 형성된다.
- 4) 용수의 소비량이 감소하면 탱크 내 수압은 증가하

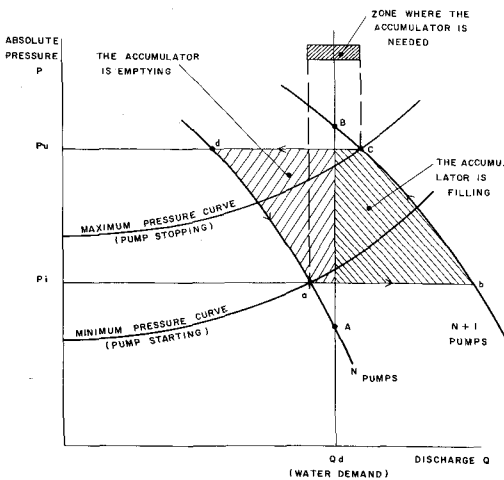


그림 9 어큐물레이터의 운영 방법

게 되고, 압력이 P_3 (점 ④)에 도달하면 두 번째 펌프가 정지하면서 운전점은 ⑤로 이동한다.

- 5) 용수의 수요량이 더욱 감소하면 탱크 내 수압은 계속 증가하고, 압력이 P_4 (점 ⑥)에 다다랐을 때 첫 번째 펌프 역시 정지된다.

용수의 수요가 주야간 또는 시간대별로 큰 폭으로 변하는 경우 송수펌프는 빈번하게 기동 및 정지를 반복하게 된다. 이러한 단점을 보완하고, 수요량과 공급량의 균형을 보다 신속히 만족시켜주기 위하여 삼천포계통 I 단계의 당초 설계⁽¹⁾시 어큐물레이터의 개념을 도입한 바 있다. 그림 9는 당초 설계시 계획되었던 어큐물레이터의 운영 방법을 나타내었는데, 이를 요약하면 다음과 같다.

삼천포계통 관로에는 조절지를 설치하지 않았으며, 이와 같이 설계된 계통은 만족스러운 수압으로 도시 상수도 수요량을 항시 공급할 수 있어야 한다. 가동될 펌프 대수는 요구 수요량 및 허용될 수 있는 상하한의 수압 범위에 의해서 결정된다. 실제 수요량이 2개의 가동점 사이에 있을 때 병렬로 배치·가동하는 펌프 대수 중 1대는 연속적으로 중지와 재시동을 반복하게 된다. 즉, 그림 9에 나타난 바와 같이 수요량, Q_d 가 a와 c 사이에서 존재할 때 송수펌프는 a→b→c→d→a와 같은 히스테리시스 루프 (hysteresis loop)를 형성하게 되어 펌프 1대가 계속 온오프 (on-off) 되어야 한다. 이와 같은 시동 및 정지 횟수를 줄이기 위하여 어큐물레이터가 필요하다. 만일 수요량, Q_d 가 어떤 시간의 실

제의 상수도 수량이라면 이는 최소 허용치 (P_i) 보다 낮은 수압 (A점)의 N 펌프 대수로서 혹은 최대 허용치 (P_u) 보다 높은 수압 (B점)의 N+1의 펌프 대수로서 충족시킬 수 있다. A의 경우 어큐물레이터는 관로로 물을 유출하고 허용된 한계 내에서 수압을 높인다. B의 경우는 관로로부터 물을 받아들여 같은 한계 내에서 수압을 낮춘다. 어큐물레이터가 비었을 때와 혹은 가득 찬 경우에만 상술한 한계 내에서 수압을 유지하지 못한다. 따라서 자동 시스템은 펌프 1대를 기동하던가 정지시킨다. 한편, 탱크 용량과 펌프 1대의 시동 빈도간의 관계는 다음 식과 같다.

$$V = \frac{T \cdot Q_m}{4} \times \frac{P_u}{P_u - P_i} \times 1.2$$

여기서,

V : 어큐물레이터의 용량 (m^3)

T : 펌프가 연속적으로 기동되는 시간 간격 (min)

Q_m : 온오프되는 펌프의 평균 토출량 (m^3/min)

P_u : 펌프정지를 위한 최대허용 절대압력

P_i : 펌프기동을 위한 최소허용 절대압력

1.2 : 안전계수

본 시스템의 경우 어큐물레이터의 용량은 $70m^3$ 이다. 펌프 1대만이 기동 혹은 정지되는 최악의 경우는 다음 식과 같다.

$$T = \frac{4V(P_u - P_i)}{1.2Q_m P_u}$$

따라서, 삼천포계통 I 단계 송수펌프를 기 설치된 어큐물레이터를 활용한 압력제어에 의한 자동운전방식으로 전환시키고자 할 경우에는 앞에서 설명한 송수펌프의 기동빈도와 교대운전 등을 고려하여 제어시스템을 구축토록 한다.

2.3.4 2호기 토출배관

그림 1에 나타난 바와 같이 삼천포계통 송수펌프 중 조절용 펌프인 2호기는 한쪽흡입 원심펌프로 선정되었기 때문에 펌프 토출배관이 180° 구부러져 설치되었다. 이 조절용 펌프는 다른 송수펌프에 비해 기동빈도가 훨씬 높게 운영되고 있는 것으로 조사되었는데, 2호기의 토출배관 내에는 공기가 갇히기 쉬운 형태로 되어 있다. 배관 정점부에 공기가 차이는 경우 유로 단면적의 축소로 유동손실이 급격히 증가할 뿐만 아니

라 송수관로에서의 수적현상에도 악영향을 미칠 수 있기 때문에 공기를 자연 배출할 수 있는 단구형 공기밸브 (air release valve)를 보완 설치하는 것이 현실적이며 가장 합리적이다.

한편, 조절용 펌프인 2호기는 정격유량이 402 m³/h 로써 주펌프의 정격유량 (=516 m³/h)과 크게 차이가 나고 있지 않다. 이에 따라 조절용으로서의 기능이 다소 떨어지고, 삼천포계통 송수관로와 같이 용수 수요처에 저류용량이 큰 배수지가 많은 경우 그 역할이 그다지 중요하지 않게 된다. 따라서 앞으로 용수의 수요량이 대폭 증가하는 경우, 2호기는 주펌프와 동일한 시방으로 변경시켜 양쪽흡입 원심펌프로 대체한다면 토출배관이 수평배관으로 놓일 수 있고, 서로 다른 성능의 펌프병렬운전을 피할 수 있어 바람직하다. 또한, 양쪽흡입 원심펌프는 한쪽흡입 펌프에 비해 캐비테이션 특성이 우수하고 축방향 추력이 적을 뿐만 아니라 유지관리도 용이하여 상수도용 펌프로서 널리 사용되고 있는 기종으로 알려져 있다.

2.3.5 송수펌프의 운전정지 절차

송수펌프의 운전을 정지시켜야 하는 경우 그 절차는 정상적인 방법에 의해 수행되어야 한다. 즉, 펌프 토출측 전동밸브를 서서히 닫기 시작하여 밸브디스크가 완전히 닫힌 후 펌프·모터의 전원을 차단함으로써 송수관로에서의 수격작용을 최소화하도록 해야만 한다. 전동밸브가 완전히 닫히지 않은 상태에서 전원을 차단하는 경우, 갑작스런 역류로 인하여 체크밸브가 급격히 닫혀 슬래밍 (slamming)에 의한 사고 발생의 우려가 있으므로 운전자는 이를 항상 조심하여야 한다.

2.3.6 심야 시간대 펌프운영

삼천포 계통의 송수관로는 그림 3에 나타난 바와 같이 여러 지역의 배수지로 용수를 공급하도록 구성되었다. 그 결과 송수펌프의 운영은 수수 지역의 용수 수요량에 따라 병렬운전대수를 조절하는 방법으로 하고 있으며, 시간대별 송수펌프의 운전현황 (그림 5)에 나타난 바와 같이 용수의 수요가 급격히 감소하는 심야 시간대에는 펌프를 1대만 운전하는 것으로 조사된 바 있다. 용수의 수요량이 많거나 체류시간이 큰 배수지의 수위를 알 수 있다면 오히려 심야 시간대에 값싼 전기를 이용하여 펌프의 운전대수를 늘려 배수지를 채우고, 전기료가 비싼 일과 중에는 펌프운전대수를 최

소화하여 전력 원단위 (kW/m³)를 현격히 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다. 본 시스템의 경우 용수의 수요가 비교적 많고 배수지 수위가 높은 용강 배수지와 사남면 배수지의 수위를 모니터링하여 심야 시간대에 송수펌프의 운전대수를 늘려 운영한다면 가장 경제적인 운영방안이 될 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 운영 방식은 심야전력이 적용되는 시간을 충분히 활용해야 하기 때문에 운영자의 판단과 노력을 상당히 요구하게 된다. 충주권 관리단의 경우를 예로 들면 수자원공사에서 관리하고 있는 각 분기점에서의 유량을 지방자치단체에 실시간으로 알려주고, 지자체에서 관리하고 있는 배수지의 수위와 유입밸브를 수자원공사에서 제어할 수 있게 서로 협력함으로써 심야 전력을 효과적으로 이용하고 있는 것으로 조사되었다.

3. 남강댐 계통 광역상수도 II 단계 사업

3.1 저양정 계통 시스템 구성

남강댐 계통 광역상수도 II 단계 사업의 저양정 계통 즉, 삼천포·남해계통과 하동계통의 관망도를 1, 2 차 사업에 따라 그림 10과 그림 11에 각각 나타내었다. 삼천포·남해 계통은 사천정수장에서 지족가압장까지 가압하여 송수한 후 다시 지족가압장에서 남해읍 아산 배수지까지 가압·송수하도록 계획되었다. 또한, 하동 계통은 정수장 송수펌프실에서 덕천가압장과 두곡·고절가압장까지 가압하여 송수한 후 덕천가압장에서 덕천통합배수지까지 그리고 두곡·고절가압장에서 두곡 배수지와 고절배수지까지 가압·송수하도록 계획되었다. 사천정수장에서 두곡·고절가압장까지의 송수관로 길이는 47.9 km이고, 관경은 1.35 m에서 1.1, 0.9, 0.8, 0.5, 0.4, 0.35 m로 점차 변한다. 삼천포 방면 분기점에서 지족가압장까지의 송수관로 길이는 39.8 km이고, 관경은 0.7 m에서 0.6, 0.45 m로 변한다. 그림 12와 그림 13은 II 단계 1, 2차 사업에 따른 삼천포·남해계통과 하동계통의 수리종단도를 각각 나타내었다. II 단계 1차 사업의 경우, 정수지가 저수위 (LWL)의 상태일 때 계획설계유량 (=60,900 m³/d)을 공급하기 위해서 송수펌프의 전양정, H_p은 다음과 같이 결정되었다.

$$H_p = HGL - LWL + H_\ell = 91.3 - 32.3 + 2.5 \approx 61.5 \text{ m}$$

여기서,

HGL : 송수펌프실 출구에서의 동수구배선 (m)

LWL : 흡수정의 저수위 (m)

H_ℓ : 송수펌프실의 구내 배관손실 (m)

사천정수장 송수펌프의 운영방안에 관한 연구

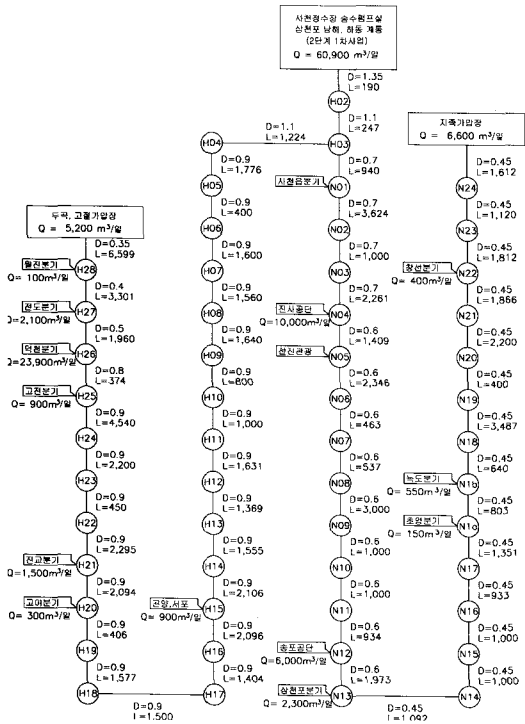


그림 10 삼천포·남해, 하동 계통 관망도 (II 단계 1차 사업)

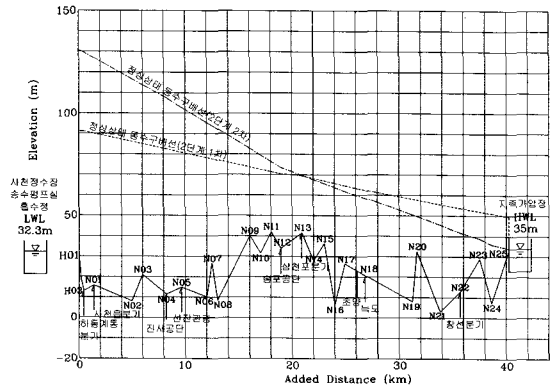


그림 12 삼천포·남해 계통 수리증단도 (II 단계)

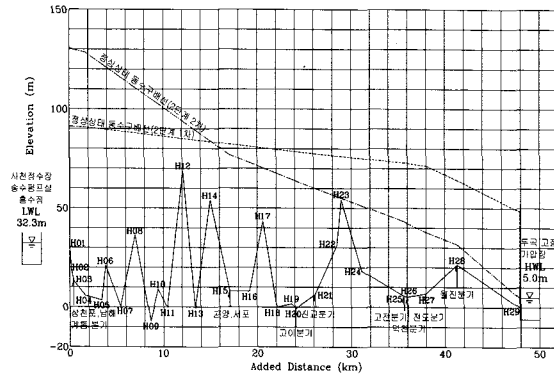


그림 13 하동 계통 수리증단도 (II 단계)

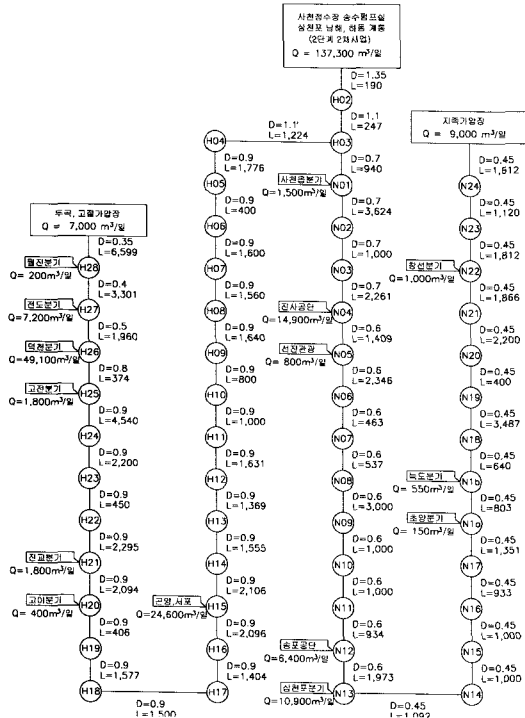


그림 11 삼천포·남해, 하동 계통 관망도 (II 단계 2차 사업)

표 6 삼천포·남해, 하동 계통의 저양정 송수펌프 현황

구분	1차 사업 (2001년)	2차 사업 (2006년)	
주펌프	유량 (m³/h)	1,620	1,620
	양정 (m)	61.5	105.5
	모터동력 (kW)	400	670
조절펌프	대수	상용 2대, 예비 1대	상용 3대, 예비 1대
	유량 (m³/h)	684	684
	모터동력 (kW)	170	300
기준시설용량 (m³/d)	60,900	137,300	

이와 같은 방법으로 결정된 남강댐계통 광역상수도 II 단계 사업의 저양정 계통 송수펌프의 현황을 표 6에 나타내었다.

3.2 저양정계통 송수펌프의 운영방안

2003년 10월 현재 남강댐 계통 광역상수도 II단계 사업 중 저양정 계통의 송수관로는 부설이 완료되어 관로를 물로 채우는 통수과정 중에 있으며, 향후 당분간 남해 계통으로만 3,000~6,600 m³/d 정도의 용수를 공급할 예정으로 있다. 사천정수장에는 표 6에 나타낸 바와 같이 II단계 1차 사업에 해당되는 송수펌프(주펌프 3대, 조절펌프 1대)가 이미 설치되었는데, 본 연구과제가 종료되는 2003년 11월경에는 남해 계통으로 용수공급이 본격적으로 이루어질 전망이다. 그런데 용수의 수요는 송수펌프실의 시설용량 (=60,900 m³/d)에 훨씬 못미치기 때문에 저양정계통 송수펌프의 안정적인 경제적인 운영방안을 모색해야 할 필요성이 대두되었다. 따라서 본 장에서는 관로조건 및 용수공급계획 등을 종합적으로 검토하여 II단계 펌프설비의 운전양정 및 변속시스템 적용 가능성 등을 타진해 보고자 한다.

3.2.1 송수펌프 토출측 밸브의 교축운전

그림 14는 6,600 m³/d의 용수공급이 남해계통(또는 지족가압장)으로만 이루어지는 경우의 수리중단도를 나타내었다. 저양정 계통 중 하동계통으로는 당분간 용수공급이 이루어지지 않을 전망이고, 삼천포·남해계통으로의 용수수요도 매우 저조하여 그다지 큰 가압시설이 필요치 않음을 알 수 있다. 사천정수장 송수펌프실에서 가압된 용수가 전량 지족가압장으로 공급된다고 가정하였을 때 관로손실은 20.7 m이고 최대실양정은 2.7 m이므로 펌프의 운전양정은 약 23.4 m에서 형성된다. 저양정계통 송수펌프실의 현재 상황으로는 조절용 펌프를 사용하여야 하는데, 조절펌프의 시방(유량 × 양정 × 동력)이 16,400 m³/d × 61.5 m × 170 kW로써 용수수요에 비추어 보았을 때 과도한 가압설비인 것은 분명하다. 이 조절용 펌프로 6,600 m³/d의 용수를 공급하기 위해서는 펌프토출측 밸브를 상당히 교축한 상태로 운전해야 하며, 성능곡선도를 참조하면 펌프운전점은 약 72.5 m에서 형성되므로 약 3배 (=72.5/23.4) 정도의 에너지를 낭비하게 됨을 알 수 있다.

또한, 펌프토출측 버터플라이밸브를 거의 닫은 채로 장시간 동안 운전하게 되면 밸브의 수명이 크게 단축될 뿐만 아니라 유동소음 및 진동 등에 의해 펌프장의 환경이 매우 나빠질 수 있으므로 이를 주의하여야 한다. 지족가압장 흡수정의 유입밸브를 교축 운영하더라도 밸브수명은 크게 단축될 수 있으며, 유입밸브를 통

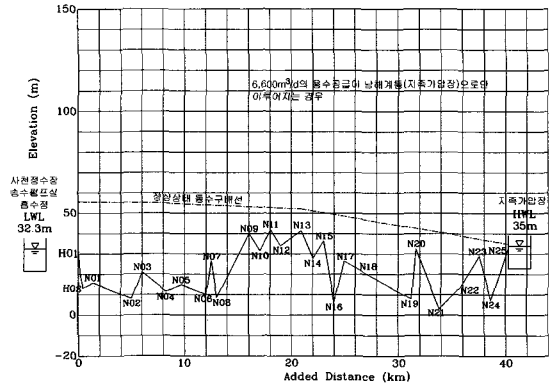


그림 14 용수공급이 남해계통으로만 이루어지는 경우의 수리중단도

과하는 유속이 매우 커서 마치 제트유동(jet flow)과 같은 형태가 되어 수리구조물의 세굴이나 충격에 의한 파손 등이 우려된다. 일반적으로 밸브에서 캐비테이션 발생 여부는 아래와 같이 판단하는데, 본 시스템의 경우 버터플라이밸브의 실용 캐비테이션 계수 ($\sigma_1=2.5\sim 3.0$)를 만족하지 못하므로 밸브디스크 하류에서 캐비테이션이 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 당분간 적은 유량을 공급하기 위해 밸브의 과도한 교축 운영이 불가피한 경우에는 가급적 빠른 시일 내에 이에 대한 대책을 수립하여 안정적인 수도시설의 운영이 이루어질 수 있도록 하여야 한다.

$$\sigma = \frac{H_2 + 10}{H_1 - H_2} = \frac{23.4 + 10}{72.5 - 23.4} = 0.68 < 2.5$$

여기서,

H_1 : 밸브 상류측 압력수두 (m)

H_2 : 밸브 하류측 압력수두 (m)

3.2.2 소유량·저양정 펌프의 설치

밸브 교축에 의한 에너지 손실을 줄이기 위하여 여러 가지 방안을 생각해 볼 수 있는데, 그 중 가까운 장래의 용수 수요량에 적합한 소유량·저양정 펌프를 보완·설치하는 방안을 대표적으로 들 수 있다. 앞에서 검토한 바와 같이 소유량·저양정 펌프의 시방(유량 × 양정)은 6,600 m³/d × 23.4 m로 결정할 수 있으나, 저양정 계통 송수관로의 통수 후 운영실적을 확인토록 할 필요가 있다. 또한, 소유량·저양정 펌프의 예비기에 대해서도 고려해야 할 것으로 사료된다. 한편, 지족가압장은 사천정수장에서 정수를 공급받아 남해군

일원에 공급하기 위해서 계획되었는데, 시설용량은 최종 목표년도인 2006년을 기준으로 하여 9,000 m³/d 규모로 설계되었다. 지족가압장 흡수정은 펌프의 잦은 온·오프시 전동기에 과열이 발생하고 기계수명이 단축되므로 펌프운영계획을 고려하여 최종목표년도의 계획용량을 기준으로 약 30분 체류시간을 갖는 용량(W6.0m×L11.0m×H3.0m)으로 결정되었다. 그러므로 여기서 제시된 소유량·저양정 펌프는 용수의 수요량과 공급량의 균형을 맞추기 위하여 지족가압장 흡수정의 수위를 기준으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.3 송수펌프의 회전속도제어

최종 목표년도에 도달되기 전 용수수요가 적은 경우에는 일반적으로 기존의 정속 펌프를 변속 시스템으로 전환시키는 방안이 경제적이다. 변속 시스템을 채택하는 경우 에너지를 절약할 수 있을 뿐만 아니라 송수펌프의 기동·정지 시 기동전류 및 충격작용을 경감시킬 수 있고, 부드러운 운전에 따라 기계설비의 수명을 더욱 늘릴 수 있는 부수적인 효과가 얻어진다. 저양정 계통의 송수펌프를 변속시스템으로 전환시키는 경우 남해계통의 용수수요는 3,000~6,600 m³/d 정도이므로 회전수 제어범위는 정격회전수의 50% 이하에서 이루어지게 된다. 남해계통 송수관로의 경우 손실양정이 펌프양정의 대부분을 차지하기 때문에 회전속도 제어방식이 효과적일 수 있다. 펌프성능곡선을 참조했을 때 주 펌프보다는 조절용 펌프가 최고효율점이 시스템 저항곡선에 근접해 있어 조절용 펌프의 회전속도를 제어하는 것이 보다 경제적이다. 그러나, 변속펌프의 설치대수를 2대 이상으로 해야 할 필요성이 있는 경우에는 주 펌프를 변속 시스템으로 전환시키는 것이 보다 합리적일 수 있다.

3.2.4 삼천포계통 I 단계와의 통합 운영

광역상수도 관로는 사고시 급수장해 지역이 방대하고, 용수공급중단이 장기화될 경우 도시 기능에 타격을 주고 공업생산에 차질을 초래하여 국가경제 전반에 걸쳐 큰 영향을 미치므로 기존 지자체 수도시설 및 II 단계 광역상수도 시설물과의 연계성을 고려하여 단수시 또는 갈수시의 상호 보완 급수체계를 구축하여 용수공급의 안정성을 확보하고자 당초 설계⁽³⁾시 계획되었다. 즉, 남강댐 광역상수도 I 단계 송수관로와 II 단계 송수관로는 사천정수장에서 통영분기, 삼천포분기 지

점까지 병렬로 계획되어 있어 단수시 또는 갈수시 상호시설의 연계를 통해 수공급의 안전성을 확보하고자 계획된 바 있다. 그림 4와 그림 12, 13을 참조하면, I 단계 시설의 경우 삼천포까지만 급수하고, II 단계 시설의 경우 하동 및 남해군까지 용수를 공급할 계획이므로 II 단계 2차사업의 동수구배선은 I 단계에 비해 훨씬 높아짐을 알 수 있다. 그러나, II 단계 1차사업의 경우 지족가압장과 두곡·고절가압장 유입부에는 상당히 큰 잔류수두가 존재하는데, 이는 당초 설계시 삼천포계통 I 단계 송수관로와의 연계 운영을 이미 염두에 두고 계획했기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 원인으로 용수수요가 적은 통수 초기년도에는 계획·설치된 송수펌프의 용량이 과다해 보이고, 수도시설의 효율적인 운영이 어려워질 수도 있다.

본 절에서는 통수 초기년도인 현재 상황 즉, 송수펌프실에 II 단계 1차사업에 해당하는 펌프가 설치되었고, 당분간 남해계통으로만 3,000~6,600 m³/d 정도의 용수를 공급할 예정인 점을 고려하여 I 단계 송수관로와의 효율적인 통합운영방안을 제시해 보고자 한다. 표 7은 당초 설계⁽³⁾시 계획된 II 단계 1차사업 저양정 계통의 송수관로에 대한 주요 지점에서의 피에조 수두(piezometric head)를 나타내었다.

표 7 주요 지점에서의 피에조수두 (II 단계 1차사업)

	주요 지점, Node	동수구배선 (HGL, m)	비 고
공통 관로	저양정 송수펌프실, H01	91.30	LWL:32.3m, HWL:35.8m
	삼천포, 하동분기점, H03	91.14	
삼천포 · 남해 계통	사천읍 분기, N01	90.11	I 단계 관로 연결지점
	진사공단 분기, N04	82.54	
	송포공단 분기, N12	70.45	
	삼천포 분기, N13	69.52	
	초양 분기, N1a	63.14	
	늑도 분기, N1b	62.22	
	창선 분기, N22	53.67	
하동 계통	지족가압장 유입부, N25	49.65	LWL:32m, HWL:35m
	곤양·서포 분기, H15	82.32	
	고이 분기, H20	78.62	
	진교 분기, H21	77.57	
	고전 분기, H25	72.97	
	덕천 분기, H26	72.67	
	전도 분기, H27	71.38	
	월진 분기, H28	64.22	
두곡·고절가압장 유입부, H29	48.57	HWL:5.0m	

I · II단계 관로의 연결지점인 사천읍 분기점 (S04, N01)에서의 피에조수두가 계획설계유량을 기준으로 각각 83.95 m와 90.11 m로 계획되어, II단계 연결 지점의 압력이 I 단계보다 높게 유지되고 있음을 알 수 있다. 따라서 II단계 시설의 주펌프 1대로써 통합·운영하는 경우, 주펌프의 시방 (유량 × 양정 × 동력)이 $38,880 \text{ m}^3/\text{d} \times 61.5 \text{ m} \times 400 \text{ kW}$ 이므로 2004년도 삼천포계통 I 단계 배분계획량인 $23,200 \text{ m}^3/\text{d}$ 과 남해계통 배분량 $4,550 \text{ m}^3/\text{d}$ 을 동시에 충분히 공급할 수 있을 것으로 판단된다. 더욱이 주펌프 1대분 용량이 I · II단계 총 용수수요량을 훨씬 초과하고 있기 때문에 이를 변속 시스템으로 전환시켜 운영한다면 장래 용수수요의 불확실성을 고려하더라도 에너지를 상당히 절약할 수 있을 뿐만 아니라 수도시설의 유연성 및 안정성을 확보하는 데에도 커다란 도움이 될 것으로 사료된다.

2차적인 연계운영 방안으로는 삼천포 I 단계 용수수요량이 $27,000 \sim 30,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 이고 남해·하동계통이 현재 $7,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 의 용수수요량을 나타내고 있어 연계 운영시 $34,000 \sim 37,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 의 용수공급이 기대되고, 이 유량에 해당하는 펌프특성곡선상의 관압이 $6.0 \sim 6.6 \text{ kg/cm}^2$ 임을 감안할 경우 5 kg/cm^2 이하의 압력에서 운영되어온 I 단계 삼천포 관로의 안전성에 문제가 될 수 있으므로 단기적인 용수수요의 증가량과 감소변화를 감안하여 주펌프 1대와 조절펌프 1대를 임펠러 커팅 (cutting)하여 최대 효율점에서의 운전압력이 5 kg/cm^2 이하에서 운영되도록 하여 용수수요량이 적은 기간 동안 대수제어를 통하여 효율적인 운영이 가능하도록 하는 것도 적은 투자비용으로 삼천포, 남해, 하동계통을 II단계 송수펌프로 통합 관리함으로써 정수장 운영관리에도 효율적인 인력운용이 이루어질 것으로 기대된다.

3.2.5 통합 운영시 주의 사항

앞에서 언급한 바와 같이 삼천포계통 I 단계 송수펌프실에는 수격완화설비로서 에어챔버가 설치되었고, II단계 사업으로 완공된 저양정 송수펌프실에는 압력 릴리프밸브 (pressure relief valve)가 설치되었다. 이러한 수격완화설비는 I · II단계 관로가 각각 독립적으로 운영되었을 때를 기준으로 계획·설계되었기 때문에 관로를 통합·운영하는 경우 수격현상에 대한 분석이 반드시 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한, 남해계

통 급수신청량 ($3,000 \text{ m}^3/\text{d}$)과 11월말 통수되는 하동계통 ($3,000 \text{ m}^3/\text{d}$) 및 통영·고성계통에서 공급되던 서포계통 ($4,000 \text{ m}^3/\text{d}$)을 II단계 관로에서 공급함으로써 12월부터 평균 $10,000 \text{ m}^3/\text{d}$ (조절펌프 효율 79%, 양정 69m의 운전점)에서 밸브개도조절로 유량을 공급할 것으로 계획하고 있고 점차적인 유량증가를 고려하였을 때 당분간은 밸브개도조절에 따른 운전으로 효율저하가 불가피하나, 조절펌프만으로 운전하는 것이 타당하다고 판단된다. 심지어, 용수수요가 적은 통수 초기년도에는 I 단계 송수펌프로 II단계 수수지역인 남해계통까지도 용수공급이 가능하나, 단지 에너지 절감차원만이 아닌 수도시설물의 노후화 및 수질 등 다각적인 면을 고려하여 통합운영을 수행해야 할 것으로 판단된다.

4. 맺음말

1) 삼천포계통 I 단계 송수펌프실의 독립 운영

삼천포 계통 I 단계 송수펌프실은 계획설계유량의 62.5% 정도로 운영되고 있기 때문에 송수펌프의 병렬 운전대수로 제어하는 방법이 합리적인 것으로 판단된다. 다만, 지자체와 잘 협력하여 주요 배수지의 수위를 모니터링 할 수만 있다면 심야 전력을 이용하여 전력 원단위를 현격히 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 삼천포 계통 송수펌프실의 주요개선 제안사항으로서 주 펌프를 교대로 운전하는 방안, 기존의 에어챔버를 급수탱크로 활용하는 방안 그리고 조절 펌프 (2호기)의 시설보완 방안 등을 도출하였다.

2) 저양정계통 II 단계 송수펌프실의 독립 운영

남강댐 계통 광역상수도 II단계 사업으로 완공된 저양정 계통 송수펌프는 통수 초기년도에 남해 계통으로만 $3,000 \sim 6,600 \text{ m}^3/\text{d}$ 정도의 매우 적은 용수를 공급할 예정이므로 소유량·저양정 펌프를 보완·설치하는 방안을 제시하였다. 즉, 저양정 계통 송수펌프실의 현재 상황으로는 조절용 펌프를 사용하여야 하는데, 조절펌프의 시방이 $16,400 \text{ m}^3/\text{d} \times 61.5 \text{ m} \times 170 \text{ kW}$ 로써 용수수요에 비추어 보았을 때 과도한 가압설비이다. 이 조절용 펌프로 $6,600 \text{ m}^3/\text{d}$ 의 용수를 공급하기 위해서는 펌프도출측 밸브를 상당히 교축한 상태로 운전해야 하며, 성능곡선도를 참조하면 펌프운전점은 약 72.5 m에서 형성되므로 약 3배 ($=72.5/23.4$) 정도의 에너지를

낭비하게 된다. 이러한 밸브 교축에 의한 에너지 손실을 줄이기 위하여 소유량·저양정 펌프의 시방은 $6,600 \text{ m}^3/\text{d} \times 23.4 \text{ m}$ 로 결정할 수 있으나, 저양정 계통 송수관로의 통수 후 운영실적을 확인토록 할 필요가 있다.

3) 삼천포계통 I 단계와 저양정계통 II 단계의 통합 운영

삼천포 I 단계 용수 수요량이 $27,000 \sim 30,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 이고 남해·하동계통이 현재 $7,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 의 용수 수요량을 나타내고 있어 연계 운영시 $34,000 \sim 37,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 의 용수공급이 기대되고 이 유량에 해당하는 펌프특성 곡선상의 관압이 $6.0 \sim 6.6 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 임을 감안할 경우 $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 이하의 압력에서 운영되어온 I 단계 삼천포 관로의 안전성에 문제가 될 수 있으므로 단기적인 용수 수요의 증가량과 감소변화를 감안하여 주펌프 1대와 조절펌프 1대를 임펠러 커팅하여 최대 효율점에서의 운전압력이 $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 이하에서 운영되도록 하여 용수 수요량이 적은 기간 동안 대수제어를 통하여 효율적인 운영이 가능하도록 하는 것이 적은 투자비용으

로 삼천포 및 남해·하동계통을 II 단계 송수펌프로 통합 관리함으로써 정수장 운영관리에도 효율적인 인력 운용이 이루어질 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국수자원공사 수도시설처의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 한국수자원공사, 1985, “남강계통 광역상수도사업,” 최종설계보고서.
- (2) 한국수자원공사, 1996, “남강담계통 광역상수도 II 단계 사업,” 실시설계보고서.
- (3) 한국수자원공사, 1999, “남강담계통 광역상수도 II 단계 추가송수관로,” 실시설계보고서.
- (4) 한국수자원공사, 2001, “남강계통 I 단계 광역상수도,” 정밀안전진단보고서.