

자양취수장 변속시스템 적용에 관한 연구

전상규* · 권득용** · 김진만** · 노형운***

1. 서 론

자양취수장 건설 후 취수량을 조사하여 취수량에 맞게 펌프 설비 용량을 변경하여 사용 중이며, 에너지 절감을 위해 속도변환 설비인 인버터를 설치하여 운전함으로써 원단위 전력을 절감하였다. 향후, 물 사용량의 증가가 예상되어 고양정 펌프로의 변경을 검토 중이다. 아래에서는 2002년 8월부터 2003년 7월까지의 운전일지를 중심으로 자료를 분석하여 보다 안정적인면서 경제적인 운영방안을 검토하고자 한다.

2. 일산권 관리단 자양취수장

2.1 시스템 구성

일산권 관리단 자양취수장 사업의 주요 연혁은 다음과 같다.

1) 시설공사

- 일산 정수장 : '90. 5.16~92.11.11 (1단계),
 '95.10.10~96.12.31 (2단계)
- 자양 취수장 : '89.12.31~92.9.27
- 관 로 : '90.4.12~92.11.30

2) 통수개시일

- 1단계 : '92. 7. 12
- 2단계 : '97. 4. 21

표 1 자양취수장 용수 배분 현황

계획 배분량 (m ³ /d)	용수 공급량 (m ³ /d)	비고
250,000 > 200,000	180,000	97년 변경

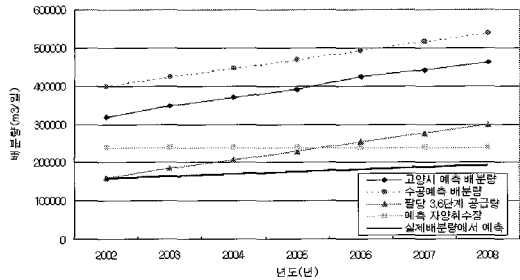


그림 1 일산권 관리단 연도별 용수공급량 변화 추이

표 2에 자양취수장 시설현황을 나타내었다.

표 2 자양취수장 시설 현황

정수장	부지면적 : 105,511m ² (31,973평)
취수 펌프 및 전동기	형식 : 황형 양흡입 벌루트 펌프
	규격 : Q = 46.3m ³ /min×82 m×2대 Q = 65.0m ³ /min×55 m×4대
	전동기 : 3φ, 6.6 kV, 1200 HP×6대
천장 크레인	형 식 : 더블거더 호이스트 크레인 (1대)
	용량 : 10.0 ton
	span : 7.5 m
	양정 : 8.0 m 주행 : 43.0 m
수전 설비	22.9 kV 3상 2회선
변전 설비	주변압기 : 22.9 kV/3.3 kV 3φ 2500kVA 2대(몰드)
	6.6 kV 수전반 : 1면
6.6 kV 수배전 설비 및 기동반	고압기동반 : 6면
	변압기반(600 kVA) : 2면
	직류전원공급설비 : 1식
	M.C.C반 : 1식
	현장조작반 : 6면

현재 자양취수장에 설치된 취수펌프의 현황을 표 3에 나타내었다.

* 효성에바라(주) 기술팀

** 한국수자원공사

*** 시립인천전문대학

E-mail : hec-sgiun@hyosung.com

표 3 일선권 관리단 자양취수장 취수펌프 현황

구분	호기	유량 (m ³ /min)	유량 (m ³ /d)	양정 (m)	효율 (%)	동력 (HP)	제작사
주펌프 (고양정)	1, 6	46.30	66,672	82.0	80	1200	이천
주펌프 (저양정)	2~5	65.00	93,600	55.0	76	1200	이천

주) 현재 자양취수장에서는 양정 55 m인 저양정 펌프만을 운전하고 있음.

2.2 운영자료 분석

운전 자료는 운전일지 자료 중 2002년 8월 1일부터 2003년 7월 31일 까지 1년간의 자료를 정리하였다. 최근 1년 동안의 취수펌프에서 취수한 취수량을 아래 그림 2에 나타내었다. 자양취수장의 시설용량은 266,500 m³/d 이나 년 평균으로 보면 설계용량의 약 61% 정도인 162,393 m³/d을 공급하고 있다.

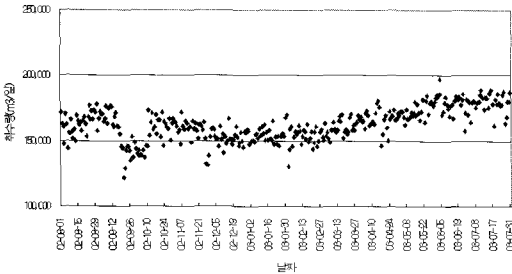


그림 2 일별 취수량 변화 추이

아래 표는 취수펌프의 1년간 운전 시간을 나타낸 표로, 고양정 펌프인 1호기와 6호기는 현재 전혀 운전하지 않고 있는 상태이며, 저양정 펌프 중에서도 인버터가 설치되어 있는 2호기와 5호기를 상대적으로 많이 운전하였음을 알 수 있다.

표 4 취수펌프 운전시간

구분	1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	6호기
년간 총운전 시간	0	4803	2934	3448	5046	0
일평균 운전시간	0	13:09	8:02	9:26	13:49	0

그림 3에는 일별 주 관 압력의 변화를 나타내었다. 그림에서 주관압력이 5 kgf/cm² 정도가 되는 경우에는 펌프가 2대 운전중인 경우이며, 2.5 kgf/cm² 정도인 경우에는 펌프가 1대 운전중인 경우이다. 또한, 주관압력이 4 kgf/cm²인 경우는 속도 변화를 하는 인버터 운전을 하는 경우로서, 2003년 1월 초순과 2월, 3월, 4월 중점적으로 인버터 운전이 이루어졌음을 알 수 있다.

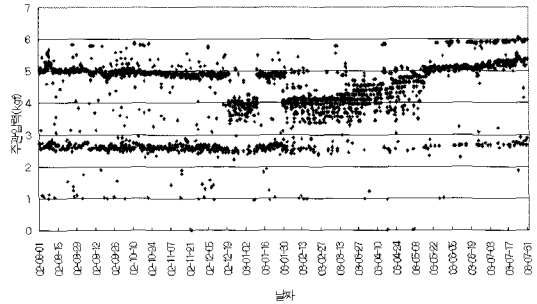


그림 3 일별 주관압력의 변화

2.3 변속시스템 적용 검토

변속시스템의 적용여부를 검토하기 위하여 그림 4와 같이 운전일지를 기초로 하여 1년 동안의 취수량과 각 펌프의 양정 변화를 관로저항곡선 ($H=19+1.89+0.00197 \times Q^2$)과 함께 나타내었다.

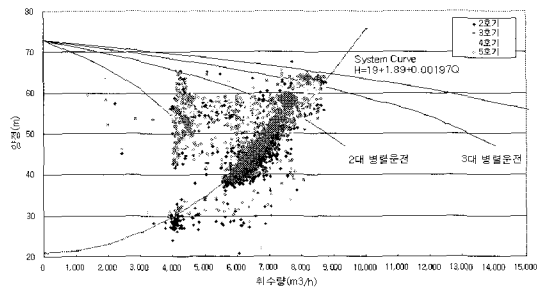


그림 4 펌프 운전 곡선

펌프는 40 m에서 60 m 사이에서 운전되었으며 주로 2대 병렬운전이 많았으며, 취수량이 4,000 m³/h인 경우에는 펌프 1대 단독운전이 이루어졌으며, 8,000 m³/h 이상의 경우에는 펌프 3대 병렬운전이 이루어지고 있다. 또한, 운전 자료는 매우 잘 정리되어 운전점이 비교적 관로저항곡선 위에서 움직이고 있음을 확인하였다.

위의 운전자료에는 인버터를 이용한 변속 운전과

정속운전의 결과가 함께 있어서 인버터 운전의 효과를 파악하기 위해 인버터 펌프가 2대 운전되는 경우만을 따로 추출하여 아래와 같은 그래프를 작성하였다.

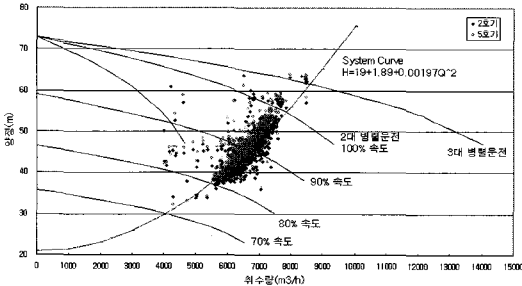


그림 5 인버터 운전 곡선

운전결과를 보면 인버터는 정격회전수의 80% 이하에서는 거의 운전되지 않았음과 시스템 곡선으로 추정된 곡선 위에서 운전점이 형성됨을 알 수 있다.

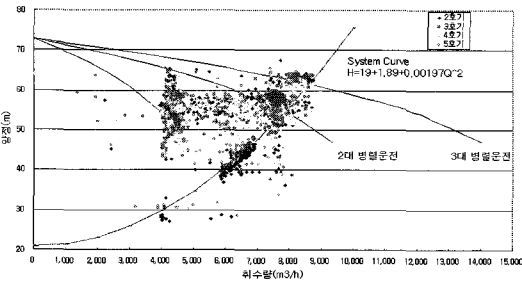


그림 6 정속운전 곡선

그림 6은 인버터 운전이 아닌 경우의 운전만을 따로 추출하여 나타낸 운전곡선으로 그림 5의 운전곡선과 차이가 많이 나고 있음을 알 수 있다. 인버터 운전의 경우 앞에서 추정된 시스템 곡선을 따라 운전점이 형성됨에 반해 정속운전은 시스템 곡선을 벗어나 대수 제어 운전 및 밸브 조정에 의해 양정이 일정하게 됨을 알 수 있다.

그림 7은 월별 전력원단위의 변화 추이를 나타낸 그림으로 인버터를 이용한 운전을 하였던 2, 3, 4월의 전력원단위가 다른 월에 비해 개선되어 경제적인 운전이 이루어졌음을 알 수 있다.

즉, 자양취수장과 같이 펌프의 실양정에 비해 손실양정이 매우 큰 펌프장인 경우는 변속시스템을 적용하는 것이 에너지절감의 관점에서 보았을 때 효과가 크

다고 볼 수 있다.

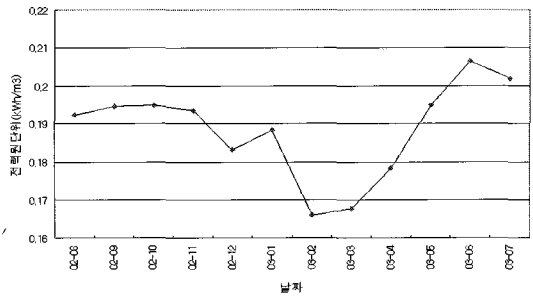


그림 7 월별 전력원단위 변화 추이

2.4 최적의 변속시스템 적용 방안

경제성 검토를 수행하기 위하여 용수수요계획을 알아야 한다. 그러나 앞서서도 지적했듯이 예측된 용수수요계획과 실제 배분되고 있는 취수량은 많은 차이를 나타내고 있다. 따라서 향후 자양취수장에 변속시스템을 사용하였을 경우의 경제성 검토는 매우 어렵다.

그러나 자양취수장은 그림 7처럼 기존에 인버터를 사용하지 않았기 때문에 그 자료를 이용하여 경제성 검토를 수행하였다. 아래와 같이 인버터 사용에 따른 경제성 효과는 인버터를 사용하였을 경우와 사용하지 않았던 경우를 비교 검토하였다 (2002년 8월~2003년 7월 12개월).

표 5 경제성 비교

구분	운영 기간	생산량 (m³/d)	소비동력 (kWh/d)	년간요금 (천원)	비고 (절감량)
변속운전	2,3,4월	162,393	27,720	607,068	-
정속운전	상기의 8개월	162,393	31,228	683,893	76,825

주) 전력요금 = 60원/kWh 기준임.

이와 같이 인버터를 적용하여 연간 에너지 절감량을 계산하여 보면 약 7천7백만원의 절감효과를 기대할 수 있다.

자양 취수장은 펌프의 실양정에 비해 손실양정이 매우 큰 펌프장으로서 펌프의 병렬운전에 따른 유량 증가효과는 크지 않다. 더구나 현재 설치된 펌프는 55m 양정의 저장형 펌프이기 때문에 펌프 4대를 병렬 운전하더라도 최대 9,000 m³/h 이상을 공급할 수 없다. 따라서 향후, 취수량을 증가시키기 위해서는 고양정 펌프인 82m 펌프로 교체하여 운전하여야 한다. 그림 8

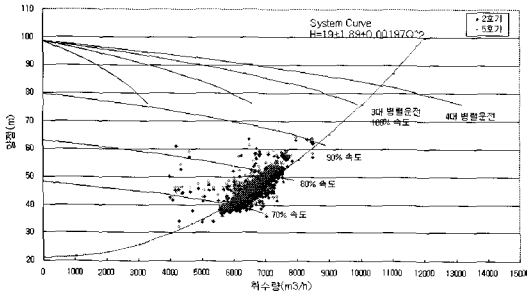


그림 8 고양정 펌프의 운전곡선

에 고양정 펌프의 병렬운전곡선을 나타내었다.

고양정 펌프로 교체시 에너지 절감 효과를 극대화하기 위해서는 현재 인버터가 설치된 펌프 2대 외에 추가로 다른 펌프 1대에도 변속시스템 (인버터 또는 유체커플링)을 도입하여 변속운전을 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 즉, 고양정 펌프는 속도변환을 하지 않는 경우 양정 76 m (펌프 성능곡선도상에 나타난 최저 양정) 이하에서는 운전이 불가능하므로 정속 펌프와 변속펌프를 병렬운전을 하더라도 76 m 이하의 양정에서는 운전이 불가능하다. 따라서 취수량의 변동에 관계없이 펌프의 양정을 76 m 이상으로 유지하여야 한다. 예를 들면, 취수량이 8,000 m³/h인 경우 필요한 양정은 약 56 m에 불과하게 되어 정격회전수의 약 85% 정도의 속도로 펌프를 3대 운전하면 되나, 정속 펌프와 변속펌프의 병렬운전시에는 정속펌프 2대와 변속 펌프 1대 (회전수는 정격회전수의 약 95%)를 운전하여야 하며 이 경우 펌프의 양정은 76 m 이상으로 유지하도록 밸브를 교축하여야 하므로 약 20 m의 압력을 밸브 교축에 의한 손실로 소모하게 된다.

그러나 10,000 m³/h 이상으로 용수를 공급할 때는 82 m의 펌프를 병렬운전하더라도 유량증가의 효과가 크지 않다. 즉 그림 8에서 볼 수 있듯이 펌프를 3대에서 4대로 증가 시 1대 증가에 따른 유량증가는 약 570 m³/h 밖에 되지 않는다. 왜냐하면 자양취수장은 펌프의 실양정에 비해 손실양정이 매우 큰 펌프장이기 때문이다.

따라서, 10,000 m³/h 이상의 용수를 공급하고자 하는 경우에는 정속펌프 3대를 병렬운전하여 운전점을 76 m로 하는 것이 더 효과적일 수 있다. 이 경우 취수량은 약 240,000 m³/d로서 당초 계획배분량 266,500 m³/d에 대해 90%에 달하게 된다.

고양정 펌프로 교체하는 경우 변속시스템 도입에

다른 경제성 효과를 분석하기 위해서는 취수량에 대한 시간대별, 일별, 월별 운영자료가 있어야 하나, 이는 현실적으로 예측하기 어려워 다음과 같은 기준으로 분석하였다. 아래에서는 변속시스템으로서 인버터를 도입하는 경우를 기준으로 분석하였다.

취수량은 208,000 m³/d 기준으로 하였으며 피크타임대 4시간, 주간 10시간, 야간 10시간으로 하여 펌프를 각각 2대, 3대, 4대 운전하는 경우를 가정하였다. 계산에 사용된 전동기 효율은 94.9%를 일괄 적용하였으며 회전수 변화에 따른 인버터의 효율 변화도 고려하였다. 또한 취수량 10,400 m³/h인 경우에는 펌프 4대 정속 운전하는 것으로 계산하였다.

변속 시스템 적용에 따른 연간 절감 전력요금은 아래와 같이 계산하였다.

연간 절감 전력 요금

$$\begin{aligned}
 &= \text{1일 절감 전력량} \times \text{연간 운전일수} \times \text{전력요금} \\
 &= 9,530 \text{ kWh/d} \times 365 \text{ 일} \times 60 \text{ 원/kWh} \\
 &= 208,707 \text{ 천원}
 \end{aligned}$$

위의 취수량 기준으로 변속운전을 하는 경우 정속운전에 비해 약 15.4% 정도의 에너지 절감을 기대할 수 있으며, 이는 10,000 m³/h 이하의 범위에서 운전시간이 길어질수록 에너지 절감 효과는 더욱 커질 것이다.

이 경우 변속시스템으로 인버터 1대를 추가하면 투자비는 기투자된 5억4천만원과 보완투자비 5천만원 외에 약 2억8천만원이 더 추가된 8억7천만원의 투자비가 예상되며 1년의 감가상각을 고려하면 3.8년 이내에 투자비 회수가 가능하다. 자양취수장은 2대의 인버터가 이미 설치되어 있어 한 대의 인버터를 더 설치하는 것이 운영면에서 더 효율적이다.

그러나 현재 자양취수장 내 인버터를 설치할 수 있는 공간의 여유가 적으므로 다른 변속시스템 (유체커플링)의 도입을 고려하여야만 한다. 유체커플링을 적용한다면 현재까지 자양취수장에서 발생된 고조파로 인한 에너지 손실 등과 같은 점들은 고려하지 않아도 된다. 단지, 유체커플링 장치 내 설치된 스쿠프 튜브 (scoop tube)의 개도를 조절함으로써 경제성 운전을 할 수 있을 것이다. 그러나, 다른 형태의 2가지 변속시스템을 동시에 운전하기 위하여 해결하여야 할 점이 있다. 이는 제어운전할 때 얼마나 빠른 시간 내 유체커플링과 인버터의 시스템 특성을 일치시켜줄 수 있는가에 달렸다. 즉 이를 위하여 말단압력신호를 동시에

표 6 인버터사용에 따른 경제성 효과 (1일 기준)

취수량 (m ³ /h)	운전 시간	취수량 (m ³)	시스템 양정	정속 펌프				변속 펌프					절감율 (%)	
				운전 대수	전양정	펌프 효율	전력량 (kWh)	운전 대수	전양정	펌프 효율	인버터 효율	변압기 효율		전력량 (kWh)
6,000	4	24,000	40	2	80	80%	6,884	3	40	79%	96%	97.4%	3,727	45.9%
8,000	10	80,000	56	3	83	80%	23,809	3	56	78%	97%	97.4%	17,436	26.8%
10,400	10	104,000	80	4	84	80%	31,324	4	84	80%	-	-	31,324	-
계	24	208,000					62,017						52,487	15.4%

주) 변압기의 Step Down 효율 : 98.7%, Step Up 효율 : 98.7% 적용함.

체크하여야 하므로 이에 대한 동기시스템 (synchronize system)도 같이 구축하여야 할 것이다. 어느 시스템을 선정하는 것에 대한 바람직한 것은 설치공간, 운전의 편이성 및 유지보수 등을 감안하여 추가 설계시 인버터 또는 유체커플링 중에서 택일하여야 할 것이다.

펌프장에 있어서의 수격작용 (waterhammer)은 정전으로 인한 진동기의 급정지 시 가장 심각하게 발생되는 현상으로서 최근 펌프장의 대용량화 추세에 따라 수격현상은 펌프장의 신뢰성, 안정성 확보의 측면에서 심각히 고려되어야 할 문제로 부각되었다.

일반적으로 수격현상이라 함은 크게 2가지로 분류되는데 첫째 압력상승에 의해 펌프, 밸브 및 관로 등이 파손되는 경우와 둘째 압력강하에 의해 수주분리가 생겨 관로가 압괴되거나 분리된 수주의 재결합시에 발생하는 충격파에 의해 피해가 생기는 경우가 있다. 그러나 일반적으로 펌프의 급정지 후 우선 펌프 토출라인을 따라 부압이 형성되므로 이 압력강하만 방지하면 이상 압력 상승 또한 방지할 수 있으므로 부압 발생의 방지가 최선의 방안이다.

자양취수장은 사업검토 단계에서 이러한 수격현상을 완화하고 안정성을 확보하기 위해 에어챔버 (air chamber)의 채택이 검토되었으나, 실시단계에서 보류되었다.

현재 자양취수장에서는 펌프 2대를 운전 중 1대를 정지하는 경우 토출밸브를 약 30~40초에 걸쳐 서서히 닫은 후 정지시키고 있는데 이 경우 관압이 상승과 하락을 반복하다 약 10여분 후에 정상적인 관압 (약 2.5 kg/cm²)으로 돌아오는 현상이 발생하고 있다. 이 때 관압은 1 kg/cm²까지 떨어지기도 한다. 따라서 취수량의 증가에 따라 고양정 펌프로 교체하기 전에 반드시 수격현상에 대하여 재검토하여 시스템의 안정성을 확보하는 것이 바람직하다.

3. 맺음말

변속시스템이 이미 설치되어 있는 자양취수장의 변속시스템을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 최적의 운전방안

- 1) 급수인구의 증가에 따라 취수량의 증가가 불가피한 상황이나, 현재 설치된 저양정 펌프는 9,000 m³/h 이상을 공급할 수 없기 때문에 저양정 펌프를 양정이 82 m인 고양정 펌프로 교체하여야 한다. 이 경우, 현재 인버터가 설치된 펌프 2대 외에 추가로 다른 펌프 1대에도 변속시스템 (인버터 또는 유체커플링)을 도입하여 정속펌프와 변속펌프를 병렬운전하는 것이 더욱 경제적인 운전방안이다. 10,000 m³/h 이상의 용수를 공급하는 경우에는 정속펌프 3대를 병렬운전하여 양정이 76 m가 되는 점에서 운전하는 것이 운전효율면에서 효과적일 수 있다.
- 2) 수격현상에 따른 펌프의 보호 및 설비의 보호를 위해서는 펌프 정지 시 수격작용에 의한 영향이 적도록 스텝제어 등 밸브폐쇄시간의 연장 등이 필요하며, 향후 고양정 펌프로 변경하여 운전하는 경우에는 반드시 사전에 수격현상에 대하여 철저한 검토를 수행하여 시스템의 안정성을 확보할 것을 제안한다.

나. 경제성 검토

정속펌프를 1대 운전하고 변속시스템을 기 적용한 2대의 펌프와 변속시스템을 1대 더 추가하여 3대를 변속운전하면 용수공급량이 208,000 m³/d 일 때 연간 2억2천만원의 비용절감 효과가 있다. 이 경우 변속시스템으로 인버터 1대를 추가하면 투자비는 기 투자된 5억

4천만원과 보완 투자비 5천만원 외에 약 2억8천만원이 더 추가된 8억7천만원의 투자비가 예상되며 1년의 감가상각을 고려하면 3.8년 이내에 투자비 회수가 가능하다.

후 기

본 연구는 한국수자원공사 수도시설처의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.