

# 운영 비용을 고려한 농업용 양수장 계획의 최적화에 관한 연구

## A Study on The Optimum Planning of An Agricultural Pumping Plant Involving Operation Cost

이 호 재\* (서울대학교 대학원) • 이 정 재 (서울대학교)

Yi, Ho Jae • Lee, Jeong Jae

### Abstract

An optimization procedure was proposed to minimize construction and operation cost simultaneously. The global criterion method was exploited to find a Pareto optimum solution to the multi-objective functions. The result was compared to the data of a real pumping plant and it was found that the optimized plan of pumping plant could reduce both of the construction and operation cost.

## 1. 서론

농업 시설물의 계획과 운용은 시설물 뿐만이 아니라 농업 시스템 전체의 계획과 운용에도 영향을 미친다. 농업 시설물이 농업 시스템 내에서 원하는 기능을 원활히 수행하기 위해서는 시설물의 설치와 운용에 필요한 자원을 사용하여야 하며, 이는 반드시 비용의 발생을 수반하게 된다. 농업 시설물의 기능과 목적을 적절히 고려하여 이를 비용으로 표현할 수 있다면 농업 시설물의 계획을 비용에 대하여 최적화 할 수 있을 것이다.

시설물의 계획 단계에서 수행하는 비용의 최적화는 대부분 시설물에 사용되는 자원에 대해서만 이루어진다. 그러나 관심의 대상이 되는 시설물은 그 시설물이 속해 있는 전체 시스템의 일부로써 기능하므로 현실적으로 농업 시설물에 관련된 비용을 최적화하기 위해서는 시설물에 사용되는 자원 이외의 요소에 의하여 발생하는 비용도 최적화하여야 한다. 이를 위해서는 여러 가지 비용에 관한 식을 동시에 고려하여야 한다. 그러나, 두 개 이상의 서로 다른 목적 함수를 동시에 만족하는 해는 존재하지 않으므로 Pareto 최적해로 알려진 개념을 이용하여 다목적함수 최적화 문제를 해결하여야 한다.<sup>3</sup>

본 연구에서는 여러 가지 제약 조건이 복합된 농업 시설물의 설계 단계에서 최적해를 구하는 방안을 제시하기 위하여 공사비와 운영비를 동시에 고려해야 하는 양수장을 대상으로 다목적함수 최적화 문제를 구성하고, 특정 양수장을 대상으로 그 적용성을 시험하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 문제의 구성

양수장을 계획하는 단계에서 고려할 수 있는 건설 비용과 운용 비용을 위한 식을 세우기 위해서 다음과 같은 가정을 수립하였다.

1. 양수장의 건설 비용은 순공사비, 기타 공사비, 용지 매수 보상비로만 구성된다.

---

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (1998년 10월 24일)

2. 양수장의 운용 비용은 펌프의 운전 비용으로만 구성된다.

이러한 가정으로부터 주어진 양수량과 양정에 따른 양수장 건설 비용과 양수장 운용 비용을 최적화 하고, 그 결과를 현재 충청남도 당진군에서 운용중인 운영 양수장의 제원 및 운전 기록과 비교하여 보았다.

먼저 양수장 건설 비용은 양정과 마력에 따른 순공사비, 부대 시설 또는 공사 중에 사용되는 가건물 등에 드는 기타 사업비, 그리고 양수장을 설치하기 위한 용지를 구입하는데 드는 용지 매수 보상비에 좌우되며 기타 사업비는 순공사비에 비례한다는 것이 알려져 있다. 한편 용지 매수 보상비는 양수장에 사용되는 pump의 크기, 댛 수와 관련이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>6</sup>

마력은 양수량과 양정에 따라 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$\frac{w_0QH}{75} = 13.33QH \text{ (HP)}$$

여기서,  $w_0$ 는 물의 단위 중량,  $Q$ 는 양수량,  $H$ 는 양정이다. 실제 펌프의 마력은 펌프의 효율이 100%가 되지 않으므로 이를 고려한 BHP를 계산하여 사용한다. BHP는 다음 식과 같다.

여기서,  $\eta$ 는 펌프의 효율이다.

$$BHP = \frac{HP}{\eta}$$

한편, 효율은 펌프의 마력에 따라 달라진다. 본 연구에서 고려한 전기 입축 사류 펌프의 효율은 다음 식으로 추정한다.<sup>1</sup>

$$\text{Efficiency of a Pump} = 47.62 + 10.66 \log_{10} HP$$

양수장의 개략공사비를 마력으로부터 구하기 위하여 마력별 개략공사비를 다음의 식으로 추정하였다.<sup>6</sup>

$$\text{Construction Cost (Won)} = 0.0004 + 0.2848 \frac{1}{BHP} - 7.4860 \frac{1}{BHP^2}$$

이렇게 결정된 펌프에 따라 개략적인 관의 구경과 필요한 펌프의 수로부터 양수장을 건설하기 위한 용지의 면적을 결정하여 용지 매수비를 계산한다. 한편 기타 공사비는 농어촌진흥공사에서 제안한 다음 식을 이용하였다.

$$\text{Secondary Construction Cost} = 0.6 \times (\text{Construction Cost})$$

이상의 내용을 고려한 첫번째 목적 함수는 다음과 같다.

$$\min (\text{Construction Cost} + \text{Secondary Construction Cost} + \text{Cost of Purchasing Land})$$

양수장의 운용 비용의 가장 큰 비중을 차지하는 것은 모터를 구동하는데 드는 직접적인 비용이다. 본 연구에서 고려한 운영 양수장의 전기 모터 펌프의 운전 비용은 운전에서 사용된 전기량과 운전 시점의 전기의 단가와 곱으로 구할 수 있다. 전기의 단가는 매년 변하며, 운전 비용은 전기량과 비례하므로 본 연구에서는 전기량만을 구하였으며 이를 최소화 하도록 목적함수를 구성하였다.

$$\min (\text{Total kWh})$$

## 2.2 다목적 함수 최적화

두 목적 함수를 동시에 최소화하는 해는 존재하지 않으므로 지금까지 알려져 있는 여러 가지 방법 중에서 'Global Criterion Method'를 사용하여 Pareto 최적해를 구하였다. 'Global Criterion Method'에서 최적해  $X^*$ 는 미리 설정된 범위  $F(X)$ 를 줄여가는 방법에 의해서 구해진다. 쉽게 구성할 수 있는 방법으로는 상대 오차의 제곱의 합을 이용하는 것이다. 이에 따르면  $X^*$ 는 다음과 같은 식에 의해서 구할 수 있다.<sup>3</sup>

$$F(X) = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{f_i(X_i^*) - f_i(X)}{f_i(X_i^*)} \right\}^2$$

여기서  $X_i^*$ 는  $i$ 번째 목적 함수의 최적해이며 이는  $f_i(x)$ 를 최소화하여 구할 수 있다.

## 2.3 적용예

충청남도 당진군 신평면 운정리에 위치한 운정 양수장과 운정 양수장의 1994년부터 1997년까지의 4개 년도의 운전 기록을 각각의 목적 함수의 최적해로부터의 상대 오차를 이용한 'Global Criterion Method'에 의해 구한 최적해와 비교하여 보았다. 먼저 운정 양수장은 운정 간선에 354,240 m<sup>3</sup>/day을 양수하기 위해서 BHP가 792.4 kW인 4대의 전기 모터를 이용한 입축 사류 펌프를 사용하고 있다. 그러나, 여기에 사용된 펌프의 특성을 앞으로 계획할 모든 양수장에 적용할 것이 아니므로 본 최적화 수행 과정에 사용한 모형에서 제시한 BHP를 사용하여 운용에 사용된 전기량을 계산하였다. 이에 따라 1994년부터 1997년까지의 양수 현황으로부터 전기량을 계산한 결과가 Table 1.에 제시되어 있다. 한편 운정 양수장의 공사비는 본 연구에서 사용한 개략공사비 식을 이용하면 1990년 현재의 가격으로 약 3,863,268,956 원이다.

Table 1. Operation Data of Un-Jeong Pumping Station (1994-1997)

Year	Total Discharge(m <sup>3</sup> )	Electricity Consumed for Pumping (kWh)
1994	103482720	5,706,973.9
1995	61744320	3,405,140.7
1996	107577360	5,932,789.4
1997	99657360	5,496,008.9
Total	372461760	20,540,912.9

'Global Criterion Method'에 의한 최적해는 3대의 펌프를 사용하는 것으로 이때 각 펌프의 BHP는 1067 마력이다. 이 때 공사비는 1990년 현재의 가격으로 3,397,419,053 원이며 이 때의 전기량은 Table 2.와 같다.

Table 2. Computed Operation Data of Un-Jeong Pumping Station (1994-1997)

Year	Total Discharge(m <sup>3</sup> )	Electricity Consumed for Pumping (kWh)
1994	103482720	5,610,230.2
1995	61744320	3,347,417.3
1996	107577360	5,832,217.7
1997	99657360	5,402,841.5
Total	372461760	20,192,706.7

정리해보면 Pareto 최적해로 구해진 3대의 1067 마력의 펌프를 사용하는 것이 현재 사용하고 있는 4대의 건설비와 운전 비용을 모두 적게 할 수 있다. 특히, 운전 비용이 적은 것은 양수장의 운용 기간이 길어질수록 총 비용의 감소에 유리하게 작용할 것이다. 만약 양수장의 총 사용기간을 모두 고려하여 최적화를 수행한다면 훨씬 양호한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

### 3. 결론

본 연구를 통하여 농업용 양수장을 예로 다목적 함수 최적화 문제를 형성하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 비용으로 표현한 목적 함수를 최적화하여 BHP가 1067인 3대의 펌프를 사용할 때가 최적임을 구하였다.
2. 이 때 공사비는 3,397,419,053 원이며 모형 적용의 대상 기간 동안의 운용에 사용된 전기량은 20,192,706.7 kWh 이다.
3. 현재 설치되어 실제로 운용중인 양수장은 BHP가 814인 4대의 펌프를 사용하고 있으며 이 때의 건설 비용은 약 3,863,268,956 원이고, 비교 대상 기간의 운용에 사용된 전기량은 20,540,912.9 kWh 로 최적화를 수행한 결과가 두 목적함수에 대하여 모두 작은 것을 알 수 있다.

이를 기초로 목적 함수를 적절히 구성하면 농업용 시설물의 규모와 위치도 동시에 고려하는 것도 가능할 것이며 설치된 농업용 시설물에 의해서 유발되는 이득도 동시에 고려한다면 농업 시설과 관련된 사업의 계획에 유용하게 이용될 수 있을 것이다. 또한, 향후 연구에서는 'Global Criterion Method'에서 각 목적 함수 특성을 고려할 수 있는 평가 함수를 이용하여야 할 것이다.

### 4. 참고문헌

- [1] Dickenson, T.C., "Pumping Manual", Elsevier Advanced Technology, 1995
- [2] Dökmeci, Vedia F., Cagdas, Gülen and Tokcan, Selma, "Multi-objective Land-Use Planning Model", J. of Urban Planning and Development, 119(1), 15-22, 1993
- [3] Rao, Singiresu S., "Engineering Optimization", John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [4] Volk, Michael W., "Pump Characteristics and Applications", Marcel Dekker, Inc., 1996
- [5] 농림수산부, "농지개량사업계획설계기준 (양배수장편)", 농림수산부, 1984
- [6] 농림수산부, "농어촌용수이용 합리화계획 자료정보 데이터베이스 구축 연구 (II)", 농림수산부, 1992