

어류양식장 생산계획에 관한 연구[†]

어 윤 양*

부경대학교 경영대학 경영학부

Production planning in fish farm

Youn-Yang EH*

Department of Management, College of Business, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

Abstract

Because land based aquaculture is restricted by high investment per rearing volume and control cost, good management planning is important in Land-based aquaculture system case. In this paper master production planning was made to decide the number of rearing, production schedule and efficient allocation of water resources considering biological and economic condition.

The purpose of this article is to build the mathematical decision making model that finds the value of decision variable to maximize profit under the constraints. Stocking and harvesting decisions that are made by master production planning are affected by the price system, feed cost, labour cost, power cost and investment cost.

To solve the proposed mathematical model, heuristic search algorithm is proposed. The model Input variables are (1) the fish price (2) the fish growth rate (3) critical standing corp (4) labour cost (5) power cost (6) feed coefficient (7) fixed cost. The model outputs are (1) number of rearing fish (2) sales price (3) efficient allocation of water pool.

Keywords : Aquaculture management, Master production planning, Search method, Land based aquaculture system

I. 연구의 배경

양식장의 생산계획은 생산자원을 효율적으로

투입하고 수자원을 효율적으로 이용하기 위하여 필요할 뿐 아니라 양식시설을 이용하여 최대 수익을 올리기 위하여 필요하다. 육상양식장의

Received 27 November 2015 / Received in revised form 15 December 2015/ Accepted 17 December 2015

[†] 이 논문은 부경대학교 자율 창의 학술 연구비(2014)에 의하여 연구되었음.

* Corresponding author : 051-629-5723, ehyy@pknu.ac.kr

경우 한정되어 있는 양식시설을 효과적으로 이용하기 위해서는 첫째, 양식수조에 어느 정도로 양식하여야 할 것인지 둘째, 물의 공급은 어느 정도로 하여야 할 것인지 셋째, 사료는 어느 정도 공급하여야 할 것인지 넷째, 언제 출하를 할 것인지 검토하고 통제하여야 한다. 육상양식장의 생산성은 양식환경과 양식방법 그리고 관리 노력에 의하여 그 성과가 결정되며 이러한 양식장의 생산성 제고문제는 세부적인 양식장의 생산계획을 전제로 한다. 육상양식장의 생산계획은 시설물의 능력계획과 연관되어 종합기본계획(master planning)을 수립하는 경우 뿐만 아니라 시설물이 있는 경우에도 한정된 자원의 제약에서 수면적과 용지의 효율적 활용이나 설정된 생산목표의 달성, 수자원 활용기술, 어류양식 기술과 연계되는 중요한 관리적 활동이라고 할 수 있다. 관리적 관점에서 생산계획은 양식장의 수익과 직결되는 중요한 문제이다. 양식장에서의 생산목표는 양식기술 측면에서 효율적으로 비용을 적게 들이면서 수익을 최대도 올릴도록 양식하는 것이다. 육상 어류양식에 대한 연구는 기존 연구(Forsberg, 1996; Halachmi, 2007)들이 있지만, 이들의 연구는 단일 양식 수조 환경에서 양식계획의 문제를 다루었다. 단일 수조 또는 양식장의 경우는 비교적 간단하게 생산계획을 수립할 수 있다. 그러나 양식장의 수조가 다수인 경우, 양식시기에 따른 양식시설의 이용과 양식장의 효율적 운용문제는 다음과 같은 이유로 어려운 문제가 된다.

첫째, 양식장 양식어류는 시장에서 판매가 될 정도의 크기만큼 양식하여야 하는데 판매크기만큼 키우기 위해서는 장기간 양식하여야 한다. 이 경우 양식기간 동안 수자원과 수면적을 이용하는 문제 즉, 언제 어느 정도의 수조를 이용하여 양식할 것인가 하는 문제는 복잡한 수조 면적 할당문제로 변하기 때문이다(Bjørndal, 2004; Eh, 2014).

둘째, 양식어종의 성장에 따른 사료효율, 관리

에 따른 생존율에 관련된 정보는 양식장의 수익에 큰 영향을 미친다. 이러한 생물적 변수와 관련된 양식계획문제는 양식수조가 증가하고, 양식어종의 종류가 증가할 때 더욱 복잡하게 된다.

다수 개의 양식수조를 가진 경우의 육상양식장 생산계획 문제는 이러한 어려움 때문에 연구가 거의 이루어지지 않았다. 생산계획은 기본적으로 생산에 투입되는 인적 물적 자원의 비용을 분석하고 수요 요구량에 맞추어 생산을 하면서 비용을 최소로 하는 생산시기와 인적 물적 투입량을 결정하는 것이다. 이러한 생산계획모형은 제조업의 경우, 시기별 수요는 정해진 상태에서 생산시기와 생산량을 결정하는 비용 중심의 생산계획모형이 구축되고 분석된다. 제조업과는 달리 양식업의 경우는 양식기간에 따라 양식대상이 성장하고 양식대상의 크기에 따라 판매가격이 변동하므로 모형 구축할 때 이를 고려하여야 한다. 다수 개의 육상 양식시설에서 양식하는 경우에 양식대상의 성장과 양식대상의 크기에 따른 가격변동과 같은 현실적인 조건을 고려하는 경우, 양식시설의 이용률을 높이고, 양식 비용을 줄이면서 수익을 최대도 올릴 수 있는 양식계획이 필요하다고 할 수 있다(Gate, 1975).

본 연구에서는 다수의 수조시설을 가지는 육상양식장 생산계획에 대하여 다음과 같이 연구하고자 한다.

첫째, 다수 개의 수조를 가지고 있는 육상양식장의 경우 생산계획에 관련된 양식비용 요소를 분석하고 이에 따른 계량적 모형을 구축하고자 한다.

둘째, 제시된 생산계획모형의 계량적 모형의 특성을 분석하고 이러한 모형의 해를 구하는 방법을 제시하고자 한다.

셋째, 제시된 생산계획모형을 기초로 하여 수치모형을 제시하고 계산적 결과를 제시하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 양식장의 생산계획에 관련된 의사결정모형을 구

축하고 Ⅲ장에서는 제시된 모형의 해를 구하는 방법을 제시하였다. Ⅳ장에서는 제시된 해법의 수치적 예를 제시하고 모형의 한계점과 앞으로의 연구에 대하여 언급하였다.

Ⅱ. 모형의 설정과 해법

1. 모형의 가정과 변수의 정의

양식업에서 가장 주요한 비용요소는 양식에 따른 사료비용, 양식기간에 따른 시설비용(감가상각비, 자본비용), 양식시설 운용에 따른 운용비용(수자원이용비용, 분조비용, 전기료, 일반관리비용, 인건비 등)과 치어비용 등을 들 수 있다. 이러한 비용요소는 생물적 생산성 요소의 변동에 따라 이익에 영향을 미치게 된다. M. Kankainen et al.(2012)은 성장률, 사료효율 그리고 생존율의 변화가 양식 수익성에 어떤 영향을 미치는가를 분석하였다. 이들은 생물학적인 생산성 요인의 변화가 어가, 사료비용, 인건비용, 투자비용, 자본비용, 치어비용 등과 같은 비용요소의 변동을 가져와 수익에 영향을 미친다는 것을 분석하고 생물적인 변수와 수익성과의 관계에 대한 회귀방정식을 도출하였다. 그러나 이러한 회귀방정식을 이용한 관계분석은 개별양식장의 환경을 고려하기 어렵다. 본 연구에서는 양식장의 규모, 운용방법 등과 같은 관리적 환경을 고려하면서 생물적 변수와 경제적 변수를 고려하는 생산계획모형을 구축하고자 한다.

양식장의 생산계획과 관련하여 생물적 변수에 대하여 본 연구는 다음과 같은 가정을 한다.

첫째, 성장률과 생존율은 양식수조에서 임계 양식 총량(critical standing crop : CSC)을 넘지 아니하면 변하지 않는다고 가정한다. 양식장 환경에서 양식어종의 무게총량(biomass)의 한계 즉 임계 양식 총량을 초과하면 생물 대사 작용에 따른 유해물질이 한계이상 발생하므로 생존율이 하락하고 성장속도가 떨어지게 된다(Cacho,

1997). 임계 양식 총량은 공간의 한계가 명확한 육상양식장에서 중요한 양식 제약조건이라 할 수 있다. 본 연구에서는 임계 양식 총량을 넘지 않는 한 생존율과 성장률은 변하지 않는다고 가정하였다.

둘째, 사료효율은 임계 양식 총량을 초과하지 않으면 분조 등의 관리적 방법에 의하여 영향을 받지 않으며, 사료중량 전환비율(feed conversion ratio : FCR)은 생체중량의 함수라고 가정한다.

셋째, 양식기간은 한정되어 있으며 양식기간의 증가에 따른 양식 어류의 생체중량은 감소하지 않는다. 이는 양식기간 동안 적절한 사료 투입 노력이 이루어지는 것을 의미하며 생체중량은 양식기간에 따른 단조증가함수임을 의미한다.

넷째, 성어의 단위 중량당 판매가격은 성어중량이 증가할수록 높아진다. 이것은 성어의 가격이 성어무게가 증가할수록 더 높아진다는 것을 의미하며 성어가격은 성어중량에 따른 단조증가함수임을 의미한다.

다섯째, 양식 생체중량은 개체별로 차이가 없이 일정하다. 이 가정은 의사결정모형의 단순성을 확보하기 위한 것이다.

일반적으로 제조업의 경우에 생산과 판매에 관련한 가장 대표적인 의사결정 방법은 생산비용을 고정비적인 요소와 변동비적 요소로 구분하여 생산량 그리고 이익과의 관계를 분석하는 CVP(cost-volume-profit analysis)가 가장 대표적인 방법이라고 할 수 있다. 그러나 양식어업에서는 양식생물의 성장에 따른 비용의 성격이 제조업과 다르게 나타나므로 CVP를 적용하기 어렵다. 양식어업에서 생산계획을 수립하기 위하여 양식비용의 성격을 다음과 같이 구분하여 볼 수 있다. 첫째는 양식기간 양식생물과 관계없이 발생하는 비용이다. 이들 비용은 양식생물의 크기와는 관계없이 일정하게 나타나며 양식시설을 보유 유지하기 위한 비용이다. 이 비용에 속하는 것은 시설투자에 따른 이차비용, 시설유지관리를 위한 인건비용, 관리비용 등을 들 수 있다. 이

들 비용은 생산계획 의사결정에 상수항으로 나타나는 항목이다. 둘째는 양식기간과 성장률 그리고 양식수량에 따라 발생하는 비용이다. 이러한 비용에는 양식기간에 따른 사료비용, 입식 치어수에 따라 발생하는 치어비용 등을 들 수 있다. 양식어업에서 사료비용은 생산량과 비례하여 발생하는 대표적인 변동비용으로 생각할 수 있다. 셋째는 양식장의 운용 및 이용방법에 따라 다르게 나타나는 운용비용을 들 수 있다. 이 운용비용에는 수조시설 이용방법에 따라 발생하는 수자원비용, 양식대상을 분조할 때 발생하는 분조비용 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 이러한 양식에 따른 비용요소를 양식비용의 회계항목과 관련하여 육상양식장에서 발생하는 비용과 수익의 성격에 가장 적합하다고 생각하는 수익 비용방정식으로 생산계획문제를 구축하고자 한다.

이상과 같은 가정 아래 모형구축에 사용되는 변수와 첨자는 다음과 같이 정의한다.

- w : 양식어류 개체 무게(g/single fish)
- $w(t)$: 양식기간 t 에서의 양식어류의 개체 무게(g(time)/single fish)
- $W(t)$: 양식기간 t 에서 양식수조 내 양식어류 전체의 생체중량(g/fish[pool])
- w_j : j 번째 분조 후 양식기간 t 에서의 양식어류의 개체 무게(g(time)/single fish)
- W_j : j 번째 분조 후 양식기간 t 에서의 개별 양식수조 내 생체중량
- W_{csc} : 수조 내에 있는 어류의 임계 양식 총량(CSC)
- $P_{(w(t))}$: 양식기간 t 에서 양식어류 개체무게에 따른 가격
- N : 전체 양식개체의 수
- n_{ij} : i 번째 수조에 j 번 분조할 때 수조안에 있는 양식개체의 수
- $C_{op}(t)$: 양식기간에 따른 운영비용

- C_f : 치어의 마리당 비용
- C_f : 치어비용
- FC : 규모에 따른 고정비용
- $c_{f\epsilon}(w(t))$: 양식어류 개체 무게($w(t)$)에 따른 누적 사료계수
- $C_{f\epsilon}(w(t))$: 개체 무게($w(t)$)에 따른 사료비용 (unit cost of feed per fish weight)
- C_{fc} : 사료비용
- C_{fc} : 사료단가
- C_d : 개별 수조 분조비용(분조에 따른 인건비)
- Cd : 수조 분조비용
- C_m : 단위 기간 수조유지비용(power cost)
- d_j : j 번째 분조할 때의 수조의 수
- p : 양식수조의 수
- i : 계산 횟수 (1, 2, ..., i)
- j : 분조의 분조횟수 번호(1, 2, ..., k)
- t : 양식기간
- τ : 양식가능 기간

2. 이론적 모형의 구축

양식장의 생산계획은 주어진 양식장에서 수익을 최대화하기 위하여 치어를 몇 마리 입식하여 양식기간을 어느 정도 하여 판매할 것인가를 결정하는 것이다. 양식계획의 수익은 판매액에서 양식에 관련된 제비용을 제하는 것으로 나타난다.

판매액(sales : S)은 양식개체 중량에 따른 가격에 판매수량 즉 양식수량을 곱하면 되므로 다음 식 (1)과 같다.

$$S = N \cdot P_{(w(t))} \quad (1)$$

넙치양식장의 경우 육상수조식 양식장의 양식비용 항목별 비중 중 3% 이상을 차지하는 비용항목은 종묘비, 사료비, 인건비, 약품비, 전력비, 장비유지비, 감가상각비 등이며, 이들이 총비용의 90% 이상을 차지한다¹⁾. 양식장의 비용

1) 국립수산과학원, 넙치양식 표준지침서, 2006. p.103.

중 이들의 비용이 대부분을 차지할 것으로 생각할 수 있다. 이들 비용항목의 성격을 분석하여 보면 다음과 같이 정리할 수 있다.

양식에 관련된 비용 중 양식수량에 따라 발생하는 치어비용은 입식치어수에 개별치어 비용을 곱하여 나타난다.

$$C_f = N \cdot C_j \quad (2)$$

양식어업의 항목에서 가장 큰 비중을 차지하는 비용은 사료비용이다. 사료비용은 사료효율(feed efficiency)과 사료의 가격에 의하여 결정된다. 사료효율은 양식조건, 양식어류의 생물적인 특성에 따른 변수이지만 대부분의 경우 양식어류 중량에 공급된 사료의 비율로 표시하는 사료중량 전환비율(feed conversion ratio : FCR)이 이용된다. FCR은 양식어류가 초기 성장단계에는 높지만 점차 성장이 되면서 점차 낮아지게 되고 성숙단계에 이르게 되면 거의 변동이 없게 된다(Schnute, 1990). 즉 양식개체의 크기가 커질수록 FCR 값은 볼록한 이차함수 형태로 증가하다 한계점에 이르면 일정하게 된다. 이 경우 사료비 변동은 성어의 출하크기의 함수이다. 왜냐하면 사료 양은 최종 양식개체무게(w)의 누적사료계수에 비례하기 때문이다. 따라서 사료비 C_{fc} 는 양식기간 t에 따른 양식 개체 무게(w)의 함수이므로 양식기간 t 동안 전체 사료비용은 다음 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{fc} = N \cdot C_{fc}(w(t)) \quad (3)$$

양식비용 중 인건비용은 양식장 운영방법에 따라 다르게 발생하는 비용이다. 인건비용은 양식장 운영에 필요한 고정인력에 따른 고정비 성격의 인건비와 분조작업과 같은 한시적 작업에 따른 인력비용 즉 변동비 성격으로 구분할 수 있다. 그러므로 양식장 운영형태에 따라 발생하는 인건비용은 분조비용에 연계된 관계식으로 표현이 가능하며 고정비는 상수의 값으로 변동비는 분조횟수의 관계식으로 나타낼 수 있다. 분조

비용은 분조의 수에 개별 분조비용의 곱으로 나타나므로 수조에서 양식중량이 임계양식총량(W_{csc})에 이르면 분조가 이루어져야 한다. 분조비용은 분조를 할 때 분조한 분조 수에 의하여 결정되므로 분조를 j번 했다면 다음 식(4)와 같이 나타난다.

$$C_d = C_d \cdot \sum_{j=1}^k d_j \quad (4)$$

양식장의 전력비는 수조이용에 따라 발생하는 비용이다. 분조 후에 양식장의 수자원을 이용하는 시간은 양식환경을 통제하지 않고 사료를 성장에 필요한 만큼 최적으로 공급한다면 양식개체의 무게(w)는 양식시간(t)에 따라 증가하게 되고 j번째 분조 후 시간(t)에 개별 양식수조에 있는 양식 어류의 무게($W_j(t)$)는 수조 안의 양식개체 수 N/d_j 와 개별 양식 어류의 크기 $w(t)$ 와의 곱의 형태로 나타나며, 이 값은 임계 양식 총량보다 작아야 한다.

$$W_j(t) = (N/d_j) \cdot w(t) \leq W_{csc} \quad (5)$$

$$t_j = w^{-1}(d_j \cdot W_{csc}/N) \quad (6)$$

j번째 분조를 한 후 수조를 이용하는 시간에 따른 비용 즉 전력비용은 분조를 할 때 이루어진 d_j 개의 이용기간에 따라 발생한다. 이 비용은 j-1번째 수조를 분조한 후 j번째 수조를 분조할 때까지 수조를 이용하는 시간에 따른 비용이다.

$$C_{mj} = C_m \cdot (t_j - t_{j-1}) \cdot (d_j) \quad (7)$$

그리고 분조한 수의 최대는 수조의 수보다 적거나 같아야 하고 분조한 수조의 수는 증가하여야 하므로 다음 식(8)의 조건을 만족시켜야 한다.

$$d_{j-1} < d_j \leq p \quad j=1, \dots, k \quad (8)$$

수조이용비용(C_{m0})은 첫 수조의 양식기간(t_0) 동안 이용하게 되므로 이용기간에 1개 수조의 이용비용(C_m)에 양식기간을 곱한 값과 같다.

$$t_0 = w^{-1}(W_{csc}/N) \quad (9)$$

$$Cm_0 = C_m \cdot t_0 \quad (10)$$

$d_{j=k}=P$ 인 경우에 즉 수조 전체에 분조되면 수조이용시간은 식 (11)로 나타나고, 이때의 수조이용비용 즉, 전력비용은 식 (11)과 같고 이용시간에 대한 제약조건은 식 (12), 식 (13)과 같다.

$$t_j = w^{-1}(p \cdot W_{csc}/N) \quad (11)$$

$$Cm_p = C_m \cdot (t_{opt} - t_p) \cdot p \quad (12)$$

$$t_{opt} \leq \tau \quad (13)$$

식 (13)은 양식장 이용기한에 대한 제약조건이다. 양식수조 p 개로 분조한 후 수온 또는 관리적 이유로 양식기간의 한계가 τ 로 주어질 때 이것은 성장의 기간적 한도로 나타난다.

약품비용은 양식장의 운영방법에 따라 증감이 있을 수 있는 비용이지만 적절한 양식방법으로 양식을 하는 경우에도 발생하는 고정비 성격의 비용으로 생각할 수 있다. 앞에서 분석한 비용항목 외 감가상각비, 수리유지비, 차량유지비, 자본이자 등의 비용도 운영방법에 따라 발생하는 비용이기보다는 규모에 따라 발생하는 고정비의 성격이므로 수식에서는 규모에 다른 상수로 표시가 가능하다.

이상과 같은 양식에 따른 비용요소를 고려하여 양식이익을 최대화하는 입식 치어 수, 양식기간, 양식장 운영방법에 관련된 수익-비용방정식 형태의 생산계획문제를 구축한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Max } z = & N \cdot P(w(t)) - N \cdot f(w(t)) - Cd \cdot \sum_{j=1}^k d_j \\ & - C_m \cdot t_0 - \sum_{j=1}^k C_m \cdot (t_j - t_{j-1}) \cdot (d_j) \\ & - C_m \cdot (t_{opt} - t_p) \cdot p - N \cdot C_f \\ & - N \cdot C_{fc}(w(t)) - FC \end{aligned}$$

subject to

$$W_f(t) = (N/d_j) \cdot w(t) \leq W_{csc}$$

$$t_j = w^{-1}(d_j \cdot W_{csc}/N)$$

$$Cm_j = C_m \cdot (t_j - t_{j-1}) \cdot (d_j)$$

$$t_0 = f^{-1}(W_{csc}/N)$$

$$Cm_0 = C_m \cdot t_0$$

$$d_{j-1} < d_j \leq p \quad j=1, \dots, k$$

$$t_0 = w^{-1}(W_{csc}/N)$$

$$Cm_p = C_m \cdot (t_{opt} - t_p) \cdot p$$

$$t_{opt} = \tau$$

$$C_{fc} = N \cdot C_{fc}(w(\tau))$$

$$W_{csc}, p, Cd, C_m, FC = \text{constant}$$

$$N, j : \text{Integer}$$

$$N, d_j, t : \text{decision variable}$$

Ⅲ. 모형의 해법과 적용

1. 모형의 해법

앞에서 제시한 이론적 모형을 보면 변수가 정수인 변수를 포함하고 있다. 그리고 비선형 목적함수와 제약조건을 가지고 있어 미적분을 이용하는 해법을 이용할 수 없는 비선형 정수계획(Nonlinear Integer programming) 문제이다. 이 경우 완전해(closed-form solution)를 구하는 일반적 방법은 없다.

제시된 문제를 해결하기 위해서는 문제의 성격에 맞는 발견적 룰(heuristic rule)을 찾아 효과적으로 해를 구하는 방법을 생각하여야 한다. 이 문제의 경우 성장에 따른 가격함수와 시간에 따른 성장함수는 단조증가함수이다. 비용 중 가장 큰 비중을 차지하는 사료비용은 성장에 따라 비례하므로 단조증가함수이다. 운용비용 중의 인건비(분조비용)와 전력비(수조이용비용)은 서로 상쇄관계에 있어 이들 비용의 합은 최적해 부근에서 오목함수의 형태를 가진다. 비용항목 중에 인건비와 전력비를 제외한 모든 비용은 단조함수이므로 이익함수는 일정범위 내에서 단봉(unimodal)형태를 가진다는 것을 알 수 있다. 변수의 성격을 보면 운용하는 수조의 수가 정수로 나타나기 때문에 열거법(enumeration

method)이나 가지치기 계산절차(branch and bound algorithm)를 적용하여 해를 구하여야 한다. 운영비용은 양식 개체수 i 가 결정되면 계산이 가능하다. 그러나 수조의 수 값이 커지면 비교하여야 하는 해의 수가 지수로 증가하기 때문에 해를 구하기가 어려워진다(Eh, 2014). 본 연구에서는 모형의 가정과 단조증가함수의 특성을 이용하여 패턴 탐색절차법(pattern search method)을 원용한 다음과 같은 발견적 방법의 계산절차를 제시하였다.

단계 1 : 초기 투입 벡터(input vector : N^0, Z^0, ε , step size(ss), minimum step size(mss), $i=0$)를 결정한다.

N 값의 최소값 N^{min} 은 $N \cdot w(t) \leq p \cdot W_{csc}$ 을 만족시키는 값이다. 모형의 가정에서 $t < \tau$ 를 만족시켜야 하는데 $t = \tau$ 이 되는 경우가 최소값이 된다. 왜냐하면 수익을 고려치 않을 경우 최대로 수조를 이용하는 기간이 양식기간 한계이고, 이 경우 양식개체의 수가 최소값이 되기 때문이다. 수익함수가 단봉인 경우 N 값의 최적해는 $N \cdot w(t_{opt}) = p \cdot W_{csc}$ 을 만족시키는 N^{max} 이다. 그러나 여기서 t_{opt} 값은 모형으로 구해야 하는 변수이므로 t_{opt} 대신 양식기간 한도에서 최대한 양식하는 경우의 t_{opt}^i 을 기준하여 N^{min} 를 계산하고 이 값의 적절한 배수를 초기 N^0 으로 한다.

목적함수 값 Z^0 는 N^0 값일 경우의 목적함수 값이다. 이 값은 N^0 값을 양식개체수로 하여 양식하는 경우 양식어류 무게에 따른 가격과 사료비를 계산한 다음, 값을 양식개체수로 하여 분조비용과 수조유지비용의 합 즉 양식장 운용비용이 최소가 되는 분조방법을 가지치기 계산절차(branch and bound algorithm)를 적용하여 해를 구한 값이다.

스텝 크기(step size : ss)는 탐색절차법(search method)을 적용할 때의 변동크기이다. 스텝 크기는 $(N^0 - N^{min})$ 값을 기준으로 하여 적절한 크기

로 정한다²⁾.

ε 값은 오차의 한계를 의미한다. 즉 계산된 해(Z^i)를 선택할 경우 최적해(Z_{opt})와의 오차가 변동($Z^i - Z_{opt}$)이 ε 이하이면 해의 탐색을 중지한다.

단계 2 : $i=0$

단계 3 : $N^{i+} = N^i + mss \times 2, N^{i-} = N^i - mss \times 2$ 를 계산하고, 이를 이용하여 Z^{i+}, Z^{i-} 를 계산한다.

단계 4 : $|Z^{i+} - Z^i| < \varepsilon$ 이 만족되면 Z^{i+} 이 해이다. 아니면 다음 단계로 간다.

단계 5 : $i=i+1$

단계 6 : $(Z^{i-1+} - Z^{i-1}) > 0$ 이면 $ss = ss \times (i)$ 로 하고 $N^i = N^{i-1} + ss \times (i)$ 를 계산한다. $(Z^{i-1+} - Z^{i-1}) < 0$ 이면 단계 24.

단계 7 : Z^i 를 계산한다.

단계 8 : $|Z^i - Z^{i-1}| < \varepsilon$ 이 만족되고 $(Z^{i-1+} - Z^{i-1}) < \varepsilon$ 면 $Max(Z^i, Z^{i-1})$ 이 해이다. 아니면 다음 단계로 간다.

단계 8 : $(Z^i - Z^{i-1}) > 0$ 이면 다음 단계로 간다. 아니면 단계 18

단계 9 : $i=i+1$

단계 10 : $N^i = N^{i-1} + ss \times (i)$ 를 계산하고 이를 이용하여 Z^i 를 계산한다.

단계 11 : 단계 8로 간다.

단계 18 : Z^{i-1+}, Z^{i-1-} 를 계산한다.

단계 19 : $Z^{i-1+} > Z^{i-1-}$ 이면 N^i 를 오른쪽 경계(RG : right guard)로 하고 N^{i-1} 은 왼쪽 경계(LG : left guard)로 한다. 만약 $Z^{i-1+} > Z^{i-1-}$ 이면 N^{i-1} 은 오른쪽 경계(RG : right guard)로 N^{i-2} 은 왼쪽 경계(LG : left guard)로 한다.

단계 20 : $i=i+1$

단계 21 : $N^i = (LG + RG)/2$ 을 계산한다.

$|N^i - N^{i-1}| \leq mss$ 이면 (Z^i, Z^{i-1}, N^{i-2}) 이 해이다. $Z^{i-1+} > Z^{i-1-}$ 이면 단계 21.

2) 스텝 크기는 얼마가 효과적인가 하는 것을 분석하는 것은 또 다른 주제라고 할 수 있다.

- 단계 21 : N^i 에 따른 Z^i 를 계산하고 Z^{i+} , Z^{i-} 를 계산한다.
- 단계 22 : $|Z^{i+} - Z^i| < \varepsilon$ 이거나 $(N^i - N^{i-1}) \leq mss$ 면 $\text{Max}(Z^i, N^{i-1}, Z^{i-2})$ 이 해이다. 아니면 다음 단계로 간다.
- 단계 22 : $Z^{i+} > Z^{i-}$ 이면 N^i 를 새로운 왼쪽 경계(LG)로 한다. $Z^{i+} < Z^{i-}$ 이면 N^i 새로운 오른쪽 경계(RG)로 한다.
- 단계 23 : 단계 20
- 단계 24 : Z^i 를 계산한다.
- 단계 25 : $|Z^i - Z^{i-1}| < \varepsilon$ 이 만족되고 $(Z^{i-1+} - Z^{i-1-}) < \varepsilon$ 면 $\text{Max}(Z^i, Z^{i-1})$ 이 해이다. 아니면 다음 단계로 간다.
- 단계 26 : $(Z^{i-1} - Z^i) > 0$ 이면 다음 단계로 아니면 단계 30
- 단계 27 : $i = i + 1$
- 단계 28 : $N^i = N^{i-1} - ss \times (i)$ 를 계산하고 이를 이용하여 Z^i 를 계산한다.
- 단계 29 : 단계 26로 간다.
- 단계 30 : Z^{i-1+} , Z^{i-1-} 를 계산한다.
- 단계 31 : $Z^{i-1+} > Z^{i-1-}$ 이면 N^{i-2} 를 오른쪽 경계(RG : right guard)로 하고 N^{i-1} 은 왼쪽 경계(LG : left guard)로 한다. 만약 $Z^{i-1+} < Z^{i-1-}$ 은 N^{i-1} 오른쪽 경계(RG : right guard)로 N^i 은 왼쪽

- 경계(LG : left guard)로 한다.
- 단계 32 : 단계 20으로 간다.
- 단계 33 : 종료

2. 모형의 수치계산 결과 분석

본 장에서는 앞에 제시된 생산계획 모형에 대한 알고리즘의 성격과 해의 성격을 분석하기 위하여 수치분석(numerical analysis)을 수행하였다. 모형에 이용된 가격함수와 사료계수, 성장률, 인건비, 전력비 등의 계수는 다음 Table 1과 같다³⁾. 이 값에서 보면 양식수조 수는 $p=15$ 이며 양식 최대기간은 330일이다. 양식수조에서 양식할 수 있는 양식무게는 W_{csc} 를 초과하지 못한다. 양식 어류의 크기에 따른 가격함수와 성장함수 그리고 사료계수의 함수는 양식구간 범위(300~1,500g) 내에서 적절하도록 설정하였다. Table 1에서의 C_m , C_d 의 값은 Table 2와 같이 양식개체수를 8,484마리로 할 경우의 비용을 기준으로 매출액 대비 85% 정도 비용이 발생하도록 모의상황을 만들고 분석의 편의를 위하여 역으로 추정하였다.

Table 2에서 인건비의 비중이 적게 나타난 것은 인건비의 고정비부분이 제외된 변동비 부분만이 나타나 있기 때문이다.

Table 1과 같은 비용수익 방정식의 초기자료

Table 1. Parameters, constants and functions for the model.

(unit : day, g, won)

Parameters	p	τ	c_f	W_{csc}	U_{cf}	C_m	C_d	FC
Value	15	330day	₩589/ea	500kg	₩1,033/kg	₩6,877/day	85,000won/ea	238,000
Price function	$P_{w(t)} = 7224.4 + 24.389 \times w(t) - 0.009w(t)^2 + 0.945w(t)^3$							
Weight function	$w(t) = -6.4278 + 1.1576t - 0.00077t^2 + 0.000018t^3$							
Feed coeff. function	$c_{fc}w(t) = -1.576 \times w(t)^2 + 0.005 \times w(t) - 0.35, w(t) \leq 1500$							
Power cost function	$C_{m_j} = 6877 \cdot (t_j - t_{j-1}) \cdot (d_j)$							
Labour cost function	labour fixed cost + $85000 \cdot \sum_{j=1}^k d_j$							

3) 본 모형에서 사용된 계수는 국립수산물과학원(2006)의 「넙치 양식 표준 지침서」의 자료를 이용하여 추정한 자료이다. 이것은 모형의 현실성을 제고하기 위해 Table 2와 같이 가중치를 조정하여 추정한 계수이다. 가중치는 대략적으로 기존 자료와 비슷한 비용크기를 가지도록 설정하였음.

Table 2. Profit and cost items according to initial vector($N^0=8484$, $ss=93$)

Items	Amount(won) ¹⁾	Item cost/total cost(%) ²⁾	Item cost/total cost(%) ³⁾
Revenue	73,354,920		
Fingering cost	5,089,800	7.9	7.8
Feed cost	22,182,955	35.5	34.3
Labour cost	2,890,000	15.7	4.4
Power cost	10,701,900	13	16.5
Fixed cost	23,800,000	28.9	36.8
Net profit	8,690,265	15	13.4

- 1) 이 값은 양식개체수를 8,484마리로 할 경우의 비용을 기준으로 매출액 대비 85% 정도 비용이 발생하도록 조정하였을 때의 수익과 비용 그리고 순이익이다.
- 2) 이 값은 국립수산물과학원(2006) 「넙치양식표준지침서」의 제주도 양식원가 항목별 %이다.
- 3) 이 값은 1)항목의 비용을 %로 나타낸 것이다. 인건비의 가중치가 낮은 것은 인건비 중 고정비용 부분이 고정비용으로 포함되었기 때문이다.

로 투입한 값은 Table 3과 같다. 이 투입자료를 이용하여 해를 구하는 과정은 Table 4와 같다. Table 4에서는 양식개체수와 수조 운용에 대한 자료 및 이익의 자료만을 표기한 것이다.

Table 4에서 나타난 해를 찾는 과정을 보면 처음 해의 존재 가능성을 검토하여 방향을 정하고 탐색방향이 결정되면 step size를 증가시켜 가며 찾는다. 목적함수의 증가방향이 바뀌면 다시 탐색방향을 찾고 오른쪽 경계(RG)와 왼쪽 경계(RG)의 중간값으로 해를 찾아 나간다. 만약 해

를 결정하는 과정에 step size가 minimum step size보다 작아지거나 이익의 변동이 변동 허용 한계에 도달하면 탐색을 끝내게 된다. 이러한 절차로 구한 해는 최적해를 보장하지는 않는다. 하지만 최적해를 구하고자 하면 구한 해 근방의 값을 계산함으로써 얻을 수 있다. 계산 알고리즘의 효율성을 평가하기 위하여 계산절차를 적용한 결과는 Table 5와 같다.

최적해에 비하여 초기값이 작은 경우에는 step size가 작은 경우 방향 탐색 후 목표해 근처

Table 3. Initial input vector for the model

Initial input vector	Initial step size	Minimum step size	Number of fingerling	Tolerance of optimal solution
Value	93	5	8390	10000

Table 4. Search process of solution

No. of iteration	Step size	No. of fish	Profit	Dividing route	Direction search	Solution
1	0	8390	8,910,880	1-2-4-6-10-15	yes	no
2	93	8297	9,159,678	1-2-3-5-9-15	no	no
3	186	8110	9,584,690	1-2-3-5-9-15	yes	no
4	279	7831	9,037,723	1-2-3-5-9-15	no	no
5	140	7971	9,739,168	1-2-3-5-9-15	yes	no
6	70	8041	9,737,189	1-2-3-5-9-15	yes	no
7	35	8006	9,800,027	1-2-3-5-9-15	yes	no
8	17	7989	9,832,136	1-2-3-5-9-15	yes	yes
9	8	7997	9,812,419	1-2-3-5-9-15	yes	no
10	4	7993	9,815,448	1-2-3-5-9-15	yes	no

Table 5. Iteration number according to Initial input vector

(unit : won)				
No. of iteration	Initial step size	Minimum step size	Number of fingerling	Tolerance of optimal solution
10	93	5	8,484	10,000
10	62	5	8,484	10,000
6	31	5	8,484	10,000
7	93	5	8,284	10,000
6	62	5	8,284	10,000
8	31	5	8,284	10,000
3	93	5	8,084	10,000
4	62	5	8,084	10,000
7	31	5	8,084	10,000
6	93	5	7,884	10,000
5	62	5	7,884	10,000
4	31	5	7,884	10,000
6	93	5	7,684	10,000
7	93	5	7,684	10,000
11	31	5	7,684	10,000

에 접근하는 데 계산횟수가 늘어나는 것으로 나타났다. 최적해에 비하여 초기값이 큰 경우에는 step size가 큰 경우 방향 탐색 후 목표해 근처에 접근하는 데 계산횟수는 적었으나 목표해 근처에서 범위를 줄이는 계산횟수가 늘어나는 것으로 분석되었다. 이러한 결과로 볼 때 계산의 횟수는 초기값과 step size에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 적절한 초기값 설정이 계산횟수를 줄이는 데 중요함을 알 수 있다.

3. 모형의 민감도

본 연구에서는 양식어류의 판매가격, 인건비, 전력비와 같은 경제적 항목의 변화에 따른 해의 변화를 살펴보았다. 각 변수에 대한 해와 변수의 변화에 따른 최적 양식 마리 수, 수조할당, 이익 및 이익의 변화율을 정리한 것은 Table 6, Table 7, Table 8과 같다.

세 가지 변수의 변동에 따른 민감도분석 결과를 보면 판매가격의 변동이 수익의 변동에 크게 영향을 미치며 인건비의 변동비 변화가 가장 적게 영향을 미치는 것으로 나타났다. Table 6에서 보면 가격의 변동에 따른 이익의 변동은 7 내지

9배에 달함을 볼 수 있다. 이것으로 볼 때 양식장의 수익을 결정짓는 가장 중요한 변수는 판매가격임을 알 수 있다. 인건비와 전력비용이 증가하는 경우 당연히 이익은 감소하는 방향으로 나타났으며 변동의 크기는 인건비의 경우에는 1/3 내지 1/4 정도로 이익의 변동을 가져왔으며, 전력비용은 거의 비슷하게 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 이러한 민감도분석을 통하여 수조관리가 양식장의 비용을 줄이는 데 더 중요한 운영요소임을 알 수 있다.

또한 분조비용 변동에 따른 해의 변동을 보면 분조비용이 작을 경우 수조할당경로가 바뀔 가능성이 높은 것으로 나타났다. 이것은 분조비용과 전력비가 상쇄관계에 있기 때문에 발생하며, 분조비용의 변동에 따른 총비용의 변화는 이러한 상쇄관계에 의하여 총비용의 변동이 줄어든다는 것을 의미한다.

즉, 분조비용의 크기는 분조경로를 결정하는데 큰 영향을 미치지만 총비용에는 영향을 적게 미치는 것으로 나타났다. 수조 분조를 적절하게 하지 않는 경우 분조비용의 변화는 작지만 전력비의 상승을 가져오므로 양식장 수조를 효과적

Table 6. Profit according to price

Profit and solution Price change rate	N	Profit(won)	Dividing route	Profit change rate
0.85	7989	-1,365,127	1-2-3-5-9-15	(1.138808)
0.90	7989	2,368,137	1-2-3-5-9-15	(0.759205)
0.95	7989	6,101,401	1-2-3-5-9-15	(0.379603)
1	7989	9,834,665	1-2-3-5-9-15	1
1.05	7989	13,567,929	1-2-3-5-9-15	1.379603
1.10	7989	17,301,193	1-2-3-5-9-15	1.759205
1.15	7989	21,034,457	1-2-3-5-9-15	2.138808

* ()는 감소를 나타냄

Table 7. Profit according to labour cost

Profit and solution Price change rate	N	Profit(won)	Dividing route	Profit change rate
0.85	7991	10,274,628	1-2-6-10-15	1.044736
0.90	7989	10,123,665	1-2-3-5-9-15	1.029386
0.95	7989	9,979,165	1-2-3-5-9-15	1.014693
1	7989	9,834,665	1-2-3-5-9-15	1
1.05	7989	9,690,165	1-2-3-5-9-15	(0.014693)
1.10	7989	9,545,665	1-2-3-5-9-15	(0.029386)
1.15	7989	6,401,165	1-2-3-5-9-15	(0.034912)

* ()는 감소를 나타냄

Table 8. Profit according to power cost

Profit and solution Price change rate	N	Profit(won)	Dividing route	Profit change rate
0.85	7989	11,373,680	1-2-3-5-9-15	1.156489
0.90	7989	10,860,675	1-2-3-5-9-15	1.104326
0.95	7989	10,347,670	1-2-3-5-9-15	1.052163
1	7989	9,834,665	1-2-3-5-9-15	1
1.05	7989	9,321,660	1-2-3-5-9-15	(0.052163)
1.10	7989	8,808,655	1-2-3-5-9-15	(0.104326)
1.15	7989	8,295,650	1-2-3-5-9-15	(0.156489)

* ()는 감소를 나타냄

으로 이용하는 것이 총비용을 줄이는 데 무엇보다 중요하다.

IV. 결 론

본 연구는 양식어업 중 육상 수조 양식장의 생산계획모형을 구축하고 그 해를 구하는 방법을

제시하였다. 제시된 모형은 양식과 관련된 생물적 변수 성장률, 사료계수와 연관된 경제적 변수 즉, 인건비, 전력비, 사료비, 감각상각비와 같은 고정비용과 양식 어류의 판매가격에 따른 수익을 분석하는 수익-비용방정식의 형태로 구축되었다. 본 연구에서 제시된 이론적 모형은 양식 기간, 양식규모, 양식수조 경로를 의사결정변수

로 하는 비선형 0-1 정수모형(Nonlinear 0-1 Integer Program)이다. 생물적 변수가 포함되는 경우에는 많은 수의 비선형함수와 동태적 형태로 정수 및 이진변수가 나타나 계산이 복잡하기 때문에 기존의 수리적 해법으로는 해결이 곤란하다. 본 연구에서는 이러한 유형의 문제를 해결하기 위하여 발견적 탐색절차법(heuristic search method)를 제시하고 제시된 이론적 모형의 특성과 설명력 그리고 현실에서의 적용가능성을 분석하기 위하여 넵치 육상 양식장의 수치분석을 실시하였다.

본 연구의 주요 연구 결과와 기여하는 바는 다음과 같다.

첫째, 양식장의 생산계획의 기존 연구에서는 단일수조의 양식장 환경 통제에 초점을 맞추어 모형을 구축하고 분석하였으나 본 연구에서는 다수개의 수조를 이용하는 경우에 성장률, 사료 계수 등과 같은 생물적 변수를 분석하여 모형을 구축하고 분석하였다는 점이다. 기존의 문헌에서는 이러한 연구가 없었던 점에서 연구기여도를 찾을 수 있다(Pascoe, 2002).

둘째, 기존의 연구에서는 하지 않은 생물적 변수와 경제적 변수를 연계하여 수익비용방정식 모형을 구축하여 계량적 의사결정 방법을 제시하였다는 점이다.

셋째, 한정된 구간에서 단봉형태의 목적함수를 가지는 비선형 모형의 해를 구하기 위하여 분단 탐색법(branch and bound method)의 개념을 기반으로 발견적 탐색법(heuristic search method)으로 최적 해를 구하는 방법을 제시하였다는 점이다.

넷째, 넵치 육상양식장의 문제에 대한 수치적 예를 제시하고 수치분석을 이용하여 의사결정 변수의 성격이 어떻게 나타나는가를 분석하였다. 이를 통하여 현실문제 적용차원에서의 모형 유용성을 입증하고 모형과 연계된 의사결정 정보를 얻을 수 있다는 것을 보였다.

이러한 연구의 결과는 양식시설의 효율적 이용과 관련된 양식면적 이용방법과 수자원 이용

에 대한 의사결정에 유용하게 이용될 수 있다. 또한 다수개의 양식수조를 가지고 육상에서 양식을 하는 양식업자나 육상 양식시설에서 다양한 양식방법을 이용할 때 나타나는 결과를 예측하고자 하는 의사결정자에게 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

본 연구의 한계와 향후 연구과제는 다음과 같다. 첫째 본 연구에서 민감도 분석을 하면서 생물적 변수 즉 생존율, 성장률, 사료 효율 등의 변동이 없는 것으로 가정하고 분석하였는데, 이에 대한 분석도 현실적 특성을 반영하여 분석한다면 더욱 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각한다. 둘째, 현실에서 모형의 유용성을 높이기 위해서는 생존율 변동을 모형 구축에 반영하여야 할 필요가 있다. 셋째, 모형의 유용성을 높이기 위하여 현실에서의 실제 자료를 얻어서 모형 구축을 하고 적용하는 연구가 이루어져야 할 필요가 있다. 또한 개별 양식장에 대한 적용이 쉬워야 하므로 간편한 적용 방법을 개발하여야 할 것으로 생각된다. 넷째, 알고리즘 측면에서 0-1 integer 프로그램 성격의 문제는 변수가 커질수록 계산량이 지수로 증가하므로 계산을 줄이면서 해를 효율적으로 구하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- Bjørndal, T., Lane, D. E. and Weintraub, A. (2004), "Operational research models and the management of fisheries and aquaculture : a review," *European Journal of Operational Research*, 156, 533 - 540.
- Cacho, O. J. (1997), "System Modelling and Bioeconomic Modelling in Aquaculture," *Aquaculture Economic and Management*, 1, 45 - 64.
- Eh, Y. Y. (2014), "Mathematical Model of Aquaculture Facility utilization," *The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 26 (2), 444 - 454.
- Forsberg, O. I. (1996), "Optimal stocking and harvesting of size · structured farmed fish : a multi-period

- linear programming approach,” *Mathematics and Computers in Simulation*, 42, 299 – 305.
- Gates, J. M. and Muller, J. J. (1975), “Optimizing the growth and marketing of fish in a controlled environment,” *Marine Technology Society Journal*, 9, 13 – 16.
- Halachmi, I. (2007), “Biomass management in recirculating aquaculture systems using queuing network,” *Aquaculture*, 262, 514 – 520.
- Kankainen M., Setära, J., Berrill, I. K., Ruohonen, K. C. Noble and Schneider, O. (2012), “How to measure the economic impacts of change in growth, feed efficiency and survival in aquaculture,” *Aquaculture Economic and Management*, 16, 341 – 364.
- National Fisheries Research and Development institute (2006) *Standard manual of Olive Flounder Culture*.
- Pascoe, S., Wattage, P. and Naik, D. (2002), “Optimal Harvesting Strategies : Practice versus Theory,” *Aquaculture Economic and Management*, 6, 195 – 208.
- Schnute, J. T. and Richards, L. J. (1990), “A Unified Approach to the Analysis of Fish Growth, Maturity and Survivorship Data,” *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47, 24 – 40.