

육상수조 어류양식 생존율에 따른 비용분석모형[†]

어 윤 양*

부경대학교 경영대학 경영학부

Cost Analysis Model according to Mortality in Land-based Aquaculture

Youn-Yang Eh*

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

Abstract

Fish mortality is the most important success factor in aquaculture management. To analyze the effect of mortality considering biological and economic condition is a important problem in land-based aquaculture.

This study is aimed to analyze the effect of mortality for duration of cultivation in land-based aquaculture. This study builds the mathematical model that finds the value of decision variable to minimize cost that sums up the water pool usage cost, sorting cost, fingerling cost and feeding cost under critical standing corp constraint.

The proposed mathematical model involves many aspects, both biological and economical: (1) number of fingerlings (2) timing and number of batch splitting event, based on (3) fish growth rate, (4) mortality, and (5) several farming expense. Numerical simulation model presented here in. The objective of numerical simulation is to provide for decision makers to analyse and comprehend the proposed model. When extensive biological and cost data become available, the proposed model can be widely applied to yield more accurate results.

Keywords : Aquaculture management, Growth rate of fish, Land-based aquaculture system, Numerical simulation, Cost function model

I. 연구의 배경

생산성은 투입량에 대한 산출량의 비율을 의미한다. 어류를 양식하는 양식장의 경우 양식장의 생산성은 생물적 관점과 경제적 관점으로 나누어 생각해 볼 수 있다. 생물적 관점에서의 생산성은 양식

Received 1 September 2016 / Received in revised form 27 September 2016/ Accepted 28 September 2016

[†] 이 논문은 2015학년도 부경대학교 연구년 지원사업에 의해 연구되었음.

*Corresponding author : +82-51-629-5723, ehyy@pknu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Fisheries Business Administration

생물의 성장률과 생존율로 나타나며 경제적 관점에서의 생산성은 투입 비용 대비 수익으로 나타난다. 생산성의 척도가 생물적 척도든지 경제적 척도든지 관계없이 이 두 척도는 매우 높은 정의 상관성을 가지고 있다. 즉 일반적으로 성장률과 생존율이 높아진다면 수익성도 높아진다. 이러한 점에서 생각하면 어떠한 척도로 접근하는가에 관계없이 양식장의 생산성은 양식대상 어종의 생물적 특성과 양식 환경 및 양식방법 그리고 관리노력에 의하여 그 성과가 결정된다고 할 수 있다. 그러나 기존의 양식장의 생산성과 관련된 연구를 보면 생물적 접근과 경제적 접근은 서로 다른 척도로 생산성을 측정하였기 때문에 생물적 생산성 변수가 어느 정도 어떻게 경제적 변수에 영향을 미치는지를 파악하기가 어려웠다. 이러한 정보 연계의 부재는 결과적으로 양식장의 관리적 노력을 효과적으로 투입하지 못하는 결과로 나타나게 된다. 양식장의 관리적 노력의 중요성은 자원의 투입이 크고 자원 운용의 제약이 클수록 더욱 크게 나타나게 된다. 운영관리 관점에서 보면 자원의 제약이 많은 육상 양식장의 경우 자원의 효율적 이용은 생산성을 높이는 데 더욱 중요하다. 왜냐하면 육상양식장은 한정된 자원과 고정비성격에 대한 투자액이 크에 따라 생산성에 따른 비용구조의 변동이 커서 이용수면적과 용지의 효율적 활용, 수자원 활용기술, 양식 기술과 연계되는 관리적 활동이 해상양식장보다 더 중요하기 때문이다. 그러므로 결과적으로 육상양식장에서의 생산성을 높이는 방법은 양식기술 측면에서 타당한 방법 즉 생존율과 성장률을 높이면서 비용을 적게 들이고 수익을 최대로 올리도록 양식하는 것이다. 이러한 문제의 명확성에도 불구하고 육상양식장의 생물적 관점과 경제적 관점이 결합된 생산성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다(Bjørndal et al., 2004).

육상양식장의 경우 생물적 관점과 경제적 관점이 결합된 양식생산성에 대한 연구가 이루어지지 않은 이유는 다음과 같은 것을 생각해 볼 수 있다.

첫째, 양식 생산성은 양식어종의 종류에 따른 양식밀도, 양식방법, 양식수온 등을 결정함에 따라 결정되어지는데 이러한 양식 환경에 따른 생물적 변수에 대한 분석이 어렵고 이것과 연계된 경제적 변수와의 관계를 분석하기 어렵기 때문이다(Kankainen et al., 2012). 기존 연구를 보면, 새우양식의 경우 생물환경변수와 생존율에 따른 생산량에 초점을 맞추어 이루어진 연구(Ruiz-Velazco, 2013)를 볼 수 있는데, 이 연구도 단일 양식수조에서 양식하는 경우에 관리적 노력에 따른 비용분석은 하지 않고 있음을 볼 수 있다.

둘째, 육상 양식장의 경우는 복수 양식수조를 이용하는 경우가 일반적이다. 대부분 어류는 장기간 동안 양식하여야 하는데 복수 양식수조를 이용하는 경우 양식기간 동안 수자원과 수면적을 이용하는 문제는 복잡한 수면적 할당문제로 변한다. 이 경우 양식시설물의 이용 및 양식환경 그리고 생물적 변수를 동시에 고려하는 경우 문제의 복잡도가 증가하여 적절한 분석이 어렵기 때문이다(Forsberg, 1996).

셋째, 기존의 연구에서는 생물적 변수인 생존율, 성장률과 경제적 변수 동시에 고려하는 연구모형이 제시되지 않았기 때문에 이에 대한 연구가 부족하였다(Schnute & Richards, 1990).

기존 연구의 한계와 관련하여, 본 연구에서는 복수 양식수조시설을 가지는 육상양식장의 경우에 생물적 변수인 생존율 성장률과 연계된 비용모형을 구축하여 분석하고자 한다. 본 연구의 구체적 연구목표는 다음과 같다.

첫째, 복수 양식수조를 가지고 있는 육상양식장의 경우, 생존율과 성장률에 관련된 양식비용 요소를 분석하고 이에 따른 수학적 비용모형을 구축하고자 한다.

둘째, 제시된 수학적 비용모형의 특성을 분석하고, 이러한 모형의 해를 구하는 방법을 제시하고자

한다.

셋째, 제시된 모형을 기초로 하여 사례 수치모형과 시뮬레이션 결과를 제시하고, 모형의 의미와 그 특성을 분석하고자 한다.

이러한 연구의 결과는 생존율 및 성장률의 변동에 따른 양식비용의 변동의 분석을 가능하게 하여 양식의사결정에 유용하게 이용될 수 있을 뿐만 아니라, 복수개의 육상양식수조를 가지고 양식하는 경우, 양식방법에 따른 양식결과를 예측하고자 하는 의사결정자에게 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 복수개의 양식수조를 가진 육상양식장에서 생존율과 성장률에 따른 비용방정식 모형을 구축하고, III 장에서는 이론적 모형의 수치적 사례모형을 구축하고 모형의 시뮬레이션 결과를 제시하였다. IV 장에서는 제시된 모형의 특성과 한계점 그리고 앞으로의 연구에 대하여 언급하였다.

II. 모형의 설정

1. 모형의 가정과 변수의 정의

양식장에서 양식수익에 가장 크게 영향을 미치는 생물적 변수는 생존율과 성장률이다. 생존율과 성장률은 양식에 따른 수익에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 사료비용, 시설비용, 양식시설 운용비용(수자원비용, 전기료, 인건비 등), 치어비용 등 전반적인 비용요소에 영향을 미친다(어윤양, 2015). 생존율과 성장률의 생물변수는 양식장 환경적 조건에 의하여 변동이 발생하며, 양식 환경을 어떻게 설정하느냐에 따라 양식비용의 변동도 발생하게 된다(Cacho, 1997). 본 연구에서는 생존율과 성장률이 양식 환경을 최적의 조건으로 하여 양식하였을 때 나타난 결과로 가정하고 성장률과 생존율에 따른 비용변동을 분석하고자 한다. 이것은 환경조건과 생물변수 그리고 비용요소 사이에 존재하는 동적 상호 교호적인 관계를 단순화하기 위한 모형설정에서의 가정이라고 할 수 있다.

생존율은 양식조건, 질병, 품종의 특성 등에 의하여 결정된다. 이러한 조건이 양식장에서 최대한 생존율을 높이는 것으로 적용되었다고 가정하면 생존율은 시간에 따른 값으로 나타나게 된다. 이 경우 생존율의 확률밀도함수(p.d.f.)는 다음 식 (1)과 같은 와이블 분포로 나타난다(Wee and Law, 1999).

$$\alpha\beta t^{\beta-1}e^{-\alpha t(\beta)} : \text{two-parameter Weibull distribution} \quad (1)$$

α : scale parameter

β : shape parameter

시간에 따른 생존율에 변화에 대한 일반적 분포는 와이블 분포이지만, 적용상의 편의성 때문에 분포의 형태가 부의 지수분포라고 가정하고 기존 연구에서 다음과 같은 형태로 이용되었다(Ruiz-Velazco et al., 2013).

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-z t} \quad (2)$$

여기서 $N(0)$ 는 초기 개체 수이고, z 는 다음 식 (2)로 나타나는 순간 사망률(instantaneous mortality rate)이다.

$$z = \frac{\ln(n_t/n_0)}{t} \quad \text{여기서 } n_t : \text{기간 } t \text{에서의 생존 개체 수} \quad (3)$$

본 연구에서는 양식기간에 따른 생존율을 식 (2)를 이용하고자 한다.

성장률은 양식조건, 사료효율, 품종의 특성 등에 의하여 결정된다. 양식장에서 최대한 성장률을 높이는 것으로 양식하였다는 것을 가장하는 경우 성장률은 시간에 따른 함수로 식 (4)와 같은 표현이 가능하다.

$$w(t) = f(t) \quad (4)$$

식 (4)는 양식 생물 개체의 중량은 시간에 따른 성장함수로 나타난다는 것을 의미한다. 이 함수는 개별 양식장에서 성장함수를 찾아야 하는데, 성장함수는 대부분의 경우 비선형이고, s형태의 성장함수로 나타나지만, 모형구축의 어려움으로 대부분의 기존 연구에서는 구분 선형접근법(piecewise linear approximation)이 이용되었다(Seginer, 2009). 본 연구에서는 개별양식장의 성장함수를 선형성의 제약이 없는 것으로 가정한다.

성장률과 생존율은 양식 수온, 수조 형태, 밀식정도 등의 양식 환경에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 양식 환경에서 양식수조 임계 양식 총량(critical standing corp : CSC)만 중요 제약조건으로 가정한다. 양식장 환경에서 양식어종의 무게총량(biomass)의 한계 즉 임계 양식 총량은 공간의 한계가 명확한 육상양식장에서 중요한 양식 제약조건이라 할 수 있다(어윤양, 2015). 본 연구에서는 임계 양식 총량을 넘지 않는 한 생존율과 성장률은 변하지 않는다고 가정하였다.

생존율과 성장률에 영향을 받는 비용요소는 사료비용, 치어비용, 양식장 운용비용, 시설비용 등을 들 수 있다. 이중 가장 큰 비용은 사료비용이며, 사료비용은 사료효율과도 밀접한 관계가 있다. 또한 사료효율은 양식조건과 품종 특성과 밀접한 관계가 있다. 사료효율의 대표적 지표는 양식어류 중량과 공급된 사료의 비율 즉 사료중량 전환비율(feed conversion ratio : FCR)이 이용된다(Schnute & Richards, 1990). 본 연구에서는 사료비용은 양식개체 중량에 비례한다고 가정한다.

이상과 같은 주요 가정 외에 모형을 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정을 하고 연구를 하고자 한다.

첫째, 양식수조에서 임계 양식 총량을 넘지 않는 한 생존율과 성장률은 변하지 않는다고 가정하였다.

둘째, 사료효율은 임계 양식 총량을 초과하지 않으면 변화가 없고, 분조 등의 관리적 방법에 의하여 영향을 받지 않으며, 사료중량 전환비율에 의하여 생체중량의 함수로 표현이 된다.

셋째, 양식 생체중량은 평균치의 값으로 계산한다. 이것은 수조 단위 부피당 양식 생체 중량은 일정하다는 것을 의미한다. 이 가정은 의사결정모형의 단순성을 확보하기 위한 것이다.

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

$N(t)$: 양식기간 t 에서 양식 어류 개체 수, 생존율 함수

$w(t)$: 양식기간 t 에서의 양식 어류의 개체 무게(g(time)/single fish), 성장률 함수

$W(t)$: 양식기간 t 에서 양식수조 내 양식 어류 전체의 무게(g/fish[pool])

$w_j(t)$: j 번째 분조 후 양식기간 t 에서의 양식 어류의 개체 무게(g(time)/single fish)

$W_j(t)$: j 번째 분조 후 양식기간 t 에서의 개별 양식수조 내 생체중량

W_{csc} : 개별 수조의 임계 양식 총량(CSC)

N_{ij} : i 번째 수조에 j 번째 분조할 때 수조안에 있는 양식개체의 수

- C_{op} : 양식기간에 따른 단위기간 당 비용
- $C_{op}(t)$: 양식기간 t 에 따른 운영비용
- C_f : 치어의 마리당 비용
- C_F : 치어비용
- $Cf(t)$: 양식기간 t 에서의 개체 사료비용
- $CF(t)$: 양식기간 t 에서의 양식 사료비용
- Cf_{fer} : 사료중량 전환비율(FCR)에 따른 양식개체 단위 무게 당 사료비용
- C_d : 개별수조 분조비용
- C_D : 수조 분조비용
- C_{M_j} : j 번째 분조하였을 때 수조 유지비용
- C_m : 단위 기간 수조유지비용
- d_j : j 번째 분조할 때의 수조의 수
- W_p : 양식수조의 수
- i : 수조의 번호(1, 2, ..., p)
- j : 분조의 횟수 번호(1, 2, ..., k)
- t : 양식기간
- τ : 양식가능 기간

2. 이론적 모형의 구축

양식장에서 생존율과 성장률에 영향을 받는 비용요소는 사료비용, 치어비용, 양식장 운용비용, 시설비용 등을 들 수 있다. 이러한 각 비용요소들을 분석하여 모형을 구축하면 다음과 같다.

양식에 관련된 비용에서 양식 수량에 따라 발생하는 비용 치어비용은 입식 치어 수에 개별치어 비용을 곱으로 나타난다.

$$C_F = N(0) \cdot C_f \quad (5)$$

개별 양식개체 사료비용 $Cf(t)$ 는 양식기간 t 에 따른 양식 개체 무게 $w(t)$ 에 따른 사료비용이므로 양식기간 t 동안 양식 개체별 사료비용은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Cf(t) = \int_0^t Cf_{fer} \cdot w(t) dt \quad (6)$$

식 (6)에서 Cf_{fer} 의 값은 시간에 따른 누적 무게에 따른 사료전환계수이다. 이 값은 생존율이 시간에 지나면서 개체수가 감소하는 것에 따라 사료량이 변동하는 것을 나타내기 위한 것이다. 양식개체 수는 시간이 지남에 따라 $N(t)$ 로 감소하므로 전체 사료비용은 다음과 같이 표현된다.

$$CF(t) = \int_0^t Cf_{fer} \cdot N(t) \cdot w(t) dt \quad (7)$$

생존율 함수가 식 (2)와 같은 부의 지수분포라면 식 (7)은 다음과 같이 나타나게 된다.

$$CF(t) = \int_0^t Cf_{fer} \cdot N(0) \cdot e^{-\alpha t} \cdot w(t) dt \quad (8)$$

양식비용 중 양식방법에 따라 달라지는 비용은 분조 비용(인건비용 등)과 수조이용기간에 따른 수자원 이용비용(전력비용, 난방비용 등)이다. 분조비용은 분조의 수에 개별 분조비용의 곱으로 나타난다. 개별수조에서 양식중량이 임계양식 총량(W_{csc})에 이르면 분조가 이루어져야 한다. 분조비용은 분조를 할 때 분조한 분조 수에 의하여 결정되므로 분조를 k 번 했다면 다음과 같이 나타난다.

$$C_D = C_d \cdot \sum_{j=1}^k d_j \quad (9)$$

최적 성장 환경을 제공한다는 가정을 하는 경우 j 번째 분조를 한 후 수조를 이용하는 시간에 따른 수자원 유지비용은 분조를 할 때 이루어진 d_j 개의 이용기간에 따라 발생한다. 이 비용은 $j+1$ 단계까지 분조할 때까지의 시간에서 j 단계까지 수조 이용 시간을 제외한 시간에 따른 비용이다. 그러므로 분조단계별 비용을 고려하는 경우 수자원 유지비용은 다음 식 (10)과 같이 나타난다.

$$C_{M_j} = \sum_{j=0}^k C_m \cdot (t_{j+1} - t_j) \cdot d_j \quad d_{j-1} < d_j \leq p \quad j=1, \dots, k \quad (10)$$

식 (10)에서 분조한 수의 최대는 수조의 수보다 적거나 같아야 하고, 분조한 수조의 수는 증가하여야 하므로 주어진 조건을 만족시켜야 한다.

식 (10)에서 분조시간은 식 (11)에서와 같이 양식수조안의 생체중량에 의하여 결정된다.

$$W_f(t) = (N(t)/d_j) \cdot w(t) \leq W_{csc} \quad (11)$$

$$t_j = w^{-1}(d_j \cdot W_{csc}/N_i) \quad j=1, \dots, k \quad (12)$$

첫 수조의 양식기간(t_0)은 첫 분조가 일어나기 전까지의 시간이므로, 수조 이용비용은 이 기간에 1개 수조의 이용비용(C_m)을 곱한 값과 같다.

$$C_{M_0} = C_m \cdot (t_1 - t_0) \quad (13)$$

$d_j = k = p$ 인 경우, 즉 수조 전체에 분조되면 수조이용시간은 양식기간 범위(τ)를 초과할 수는 없으므로 이때의 수조이용비용은 식 (14)와 같고, 분조를 처음 할 때까지 수조이용비용은 수조를 1개를 분조할 때까지 비용이다. 이용시간에 대한 제약조건은 식 (15)와 같다.

$$C_{M_j=k} = C_m \cdot p \cdot (\tau - t_k), M_{M_j=0} = C_m \cdot t_1 \quad (14)$$

$$t \geq \tau \quad (15)$$

치어비용은 초기 치어 수에 각 마리당 가격을 곱한 값으로 다음 식 (16)과 같이 간단하게 나타난다.

$$C_F = C_f \cdot N(0) \quad (16)$$

양식장 이용기간에 따라 나타나는 비용 중 기간 인건비, 감가상각비 등은 이용수준에 따라 발생하는 비용이 아니고 기간에 따른 비용이다. 그러므로 이 비용은 다음과 같이 나타난다.

$$C_{op}(\tau) = C_{op} \cdot \tau \quad (17)$$

이상의 관계를 정리하여 비용방정식을 구축한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \int_0^t C_{f_{fer}} \cdot N(t) \cdot w(t) dt + C_d \cdot \sum_{j=1}^k d_j + \sum_{j=1}^k C_m \cdot (t_{j+1} - t_j) \cdot d_j + C_m \cdot t_1 \\ & + C_m \cdot p \cdot (\tau - t_k) + C_f \cdot N(0) + C_{op} \cdot \tau \end{aligned}$$

subject to

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

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

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

$$t_{j=1} = w^{-1}(p \cdot W_{csc}/N(t))$$

$$N(t) = N(0) \cdot e^{z}, \quad z = \frac{\ln(n_t/n_0)}{t}$$

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

$$t \geq \tau$$

$$C_{f_{fer}}, W_{csc}, p, z, N(0), \tau = \text{constant}$$

$$j, N(0) : \text{integer}$$

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

위 이론적 모형을 보면, 정수인 변수를 포함하고 있고 비선형 목적함수와 제약조건을 가지고 있어 미적분을 이용하는 해법을 이용할 수 없으며, 완전해(closed-form solution)를 구하기 어렵다. 변수가 정수를 포함하고 있는 경우는 열거법(enumeration method)이나 가지치기 계산절차(branch and bound algorithm)를 적용하여 해를 구하여야 하는데, 변수의 값이 커지면 비교하여야 하는 해의 수가 지수로 증가하기 때문에 최적의 해를 구하기가 어려워진다. 본 연구에서 나타난 모형의 해를 구하는 방법은 어윤양(2014)의 발견적 방법을 이용하여 구할 수 있다.

Ⅲ. 사례모형의 구축과 분석

본 장에서는 성장률과 생존율에 따른 이론적 기본모형을 기반으로 모의적 모형을 구축하여 수치 분석(numerical analysis)을 수행하여 생존율에 따른 변화를 시뮬레이션하였다. 먼저 생존율에 따른 모형의 분석을 위하여 어윤양(2015)에서 제시된 넙치양식장에서의 모의사례를 기반으로 모형을 구축하였다.

모형에 이용된 성장률, 생존율, 사료계수, 운영비용에 이용된 인건비, 전력비 등의 계수는 다음 <표 1>과 같다. 양식수조 수는 p=15로 정하였으며, 양식기간은 280일 지나면 판매 가능한 수준으로 설정하

<표 1> 모형에서 이용된 계수, 상수 및 함수

(단위 : 일, Kg, 마리, 원)

계수, 상수, 함수	p	τ	$C_{f_{fer}}$	c_f	W_{csc}	C_m	C_d
값	15	280	26.341	₩589/ea	500kg	₩6877/일	85000원/ea
성장함수	$w(t) = -6.4278 + 1.1576t - 0.00077t^2 + 0.000018t^3$						
수자원이용비용	$C_{m_j} = 6877 \cdot (t_j - t_j - 1) \cdot (d_j)$						
분조비용	$85000 \cdot \sum_{j=1}^k d_j$						

고 분석기간을 280일까지로 설정하였다. 양식수조에서 양식할 수 있는 임계무게총량(W_{esc})은 500Kg로 정하였다.

기간에 다른 운영비는 생존율에 따라 변하지 않는 고정비적인 성격이므로 분석모형에서는 제외하였다. <표 1>에서 제시된 값으로 생존율에 따른 모형을 구축하면 다음과 같다.

$$Min z = \int_0^{280} 26.341 \cdot N(t) \cdot e^{-z} \cdot (-6.4278 + 1.1576t - 0.00077t^2 + 0.000018t^3) dt +$$

$$85000 \cdot \sum_{j=1}^k d_j + \sum_{j=1}^k 6877 \cdot (t_{j+1} - t_j) \cdot d_j + 6877 \cdot 15 \cdot (280 - t_k) + 6877 \cdot t_1 + 588 \cdot N(0)$$

subject to

$$(N(t)/d_j) \cdot (-6.4278 + 1.1576t - 0.00077t^2 + 0.000018t^3) \leq 500$$

$$t_0 = f^{-1}(500/N(t_{j=1}))$$

$$t_{j=k} = w^{-1}(15 \cdot 500/N(t))$$

$$t_{j=1} = w^{-1}(d_j \cdot 500/N(t))$$

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-z}, \quad z = \frac{\ln(n_t/n_0)}{t}$$

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

$$t \geq \tau$$

$$C_{f_{jcr}}, W_{esc}, p, \tau = \text{constant}$$

$j, N(0)$: integer

d_j, t : decision variable

이상에서 제시한 사례모형에서 생존율이 100%라고 가정하는 경우, 즉 $N(0)=N(t)$ 인 경우의 해는 어윤양(2014)에서 제시한 해법에 따라 구하면 다음과 같다.

<표 2> 생존율 100%인 경우의 최적해

(단위 : %, 일, 원)

생존율	분조경로	분조횟수	수조이용시간	투입 치어수	총비용
100	1 · 2 · 4 · 6 · 10 · 15	37	1,912	11,382	43,304,106

<표 2>에서 나타난 해를 보면 생존율이 일정한 경우, 즉 처음 투입한 치어를 입식하여 양식 기간 동안 온전하게 양식한 경우 W_{esc} 를 초과하기 때문에 분조를 하게 되는 횟수는 5번 이루어졌다. 첫 분조는 2개로, 그 다음은 4개, 다음은 6개에서 10개 15개로 분조됨을 볼 수 있다. 이 때 수조를 이용하는 총 시간은 1,912일이며, 수조 평균 이용시간은 127.47일(=1912일/15개)로 나타난다. 이때의 시설 이용률(시설이용시간/시설가용시간)을 계산하여 보면 45.5%(127.47/280)로 나타난다. 총비용에서 사료비용은 46.9% 분조비용은 7.3% 수조비용은 30.4% 치어비용은 15.5% 정도로 나타나고 있다. 이 결과는 100% 생존율에 따른 비용의 최적해이다. 모형의 특성을 분석하기 위하여 생존율의 범위를 52%에서 82%로 설정하고, 280일 양식기간이 지난 후 같은 양식무계를 가지도록 설정을 한 후 각 생존율에서의 최적해를 구한 결과는 <표 3>과 같다.

<표 3>에서 생존율에 따른 비용분석을 위하여 최적해의 비용부분을 구분하여 정리한 결과는

육상수조 어류양식 생존율에 따른 비용분석모형

<표 3> 생존율에 따른 최적해

(단위 : %, 회, 일, 마리, 원)

생존율	분조경로	분조횟수	수조이용시간	투입 치어수	총비용
52	경로2	38	2,316	21,890	55,915,355
54	경로2	38	2,286	21,079	54,949,084
56	경로2	38	2,263	20,326	54,084,072
58	경로2	38	2,236	19,625	53,238,201
60	경로2	38	2,217	18,971	52,483,908
62	경로2	38	2,198	18,359	51,765,767
64	경로2	38	2,178	17,785	51,072,561
66	경로2	38	2,158	17,246	50,411,697
68	경로2	38	2,143	16,739	49,814,092
70	경로2	38	2,123	16,261	49,203,588
72	경로2	38	2,106	15,809	48,641,062
74	경로1	37	2,107	15,382	48,137,883
76	경로1	37	2,090	14,977	47,614,262
78	경로2	38	2,062	14,593	47,120,536
80	경로1	37	2,056	14,228	46,622,611
82	경로1	37	2,047	13,881	46,206,077
100	경로1	37	1,912	11,382	43,304,106

*경로1 : 1-2-4-6-10-15 경로2 : 1-2-4-7-10-15

<표 4> 생존율에 따른 최적해(비용)

(단위 : %, 일, 원)

생존율	치어비용	사료비용	분조비용	수조비용	총비용
52	12,893,070	23,865,153	3,230,000	15,927,132	55,915,355
54	12,415,548	23,582,713	3,230,000	15,720,822	54,949,084
56	11,972,136	23,319,284	3,230,000	15,562,651	54,084,072
58	11,559,304	23,071,925	3,230,000	15,376,972	53,238,201
60	11,173,994	22,833,605	3,230,000	15,246,309	52,483,908
62	10,813,542	22,606,578	3,230,000	15,115,646	51,765,767
64	10,475,619	22,388,836	3,230,000	14,978,106	51,072,561
66	10,158,176	22,182,955	3,230,000	14,840,566	50,411,697
68	9,859,406	21,987,274	3,230,000	14,737,411	49,814,092
70	9,577,709	21,796,008	3,230,000	14,599,871	49,203,588
72	9,311,661	21,616,438	3,230,000	14,482,962	48,641,062
74	9,059,995	21,443,049	3,145,000	14,489,839	48,137,883
76	8,821,574	21,274,758	3,145,000	14,372,930	47,614,262
78	8,595,380	21,114,782	3,230,000	14,180,374	47,120,536
80	8,380,495	20,958,004	3,145,000	14,139,112	46,622,611
82	8,176,093	20,807,765	3,145,000	14,077,219	46,206,077
100	6,703,998	20,306,284	3,145,000	13,148,824	43,304,106

<표 4>와 같다.

<표 4>의 결과는 성장률의 변동에 따른 비용의 민감도 분석이 어려우므로 생존율 100%인 경우의 최적해를 기준으로 한 경우의 값과 각 생존율에서의 최적해를 기준으로 한 경우의 상대적 비율과 증분을 계산한 결과는 <표 5>, <표 6>과 같다.

어 윤 양

<표 5> 100% 생존율 기준 생존율에 따른 비용 변동

(단위 : %, 원)

생존율	치어 비용	치어비용 증분	사료 비용	사료비용 증분	분조 비용	분조비용 증분	수조 비용	수조비용 증분	총비용
52	0.297733	0.011027	0.551106	0.006522	0.074589	0	0.367797	0.004764	1.291225
54	0.286706	0.010239	0.544584	0.006083	0.074589	0	0.363033	0.003653	1.268912
56	0.276467	0.009533	0.538501	0.005712	0.074589	0	0.35938	0.004288	1.248936
58	0.266933	0.008898	0.532788	0.005503	0.074589	0	0.355093	0.003017	1.229403
60	0.258035	0.008324	0.527285	0.005243	0.074589	0	0.352075	0.003017	1.211985
62	0.249712	0.007803	0.522042	0.005028	0.074589	0	0.349058	0.003176	1.195401
64	0.241908	0.007331	0.517014	0.004754	0.074589	0	0.345882	0.003176	1.179393
66	0.234578	0.006899	0.51226	0.004519	0.074589	0	0.342706	0.002382	1.164132
68	0.227678	0.006505	0.507741	0.004417	0.074589	0	0.340324	0.003176	1.150332
70	0.221173	0.006144	0.503324	0.004147	0.074589	0	0.337147	0.0027	1.136234
72	0.21503	0.005812	0.499178	0.004004	0.074589	0.001963	0.334448	-0.00016	1.123244
74	0.209218	0.005506	0.495174	0.003886	0.072626	0	0.334607	0.0027	1.111624
76	0.203712	0.005223	0.491287	0.003694	0.072626	-0.00196	0.331907	0.004447	1.099532
78	0.198489	0.004962	0.487593	0.00362	0.074589	0.001963	0.32746	0.000953	1.088131
80	0.193527	0.00472	0.483973	0.003469	0.072626	0	0.326507	0.001429	1.076633
82	0.188806	0.003994	0.480503	0.01158	0.072626	0	0.325078	0.021439	1.067014
100	0.154812		0.468923		0.072626		0.303639		1

<표 6> 개별 생존율에 따른 비용 변동

(단위 : %, 원)

생존율	치어 비용	치어비용 증분	사료 비용	사료비용 증분	분조 비용	분조비용 증분	수조 비용	수조비용 증분	총비용
52	0.230582	0.004636	0.426809	-0.00237	0.057766	-0.00102	0.284844	-0.00125	1
54	0.225946	0.004585	0.429174	-0.00199	0.058782	-0.00094	0.286098	-0.00165	1
56	0.221362	0.004237	0.431167	-0.0022	0.059722	-0.00095	0.287749	-0.00108	1
58	0.217124	0.004221	0.433372	-0.00169	0.060671	-0.00087	0.288833	-0.00166	1
60	0.212903	0.00401	0.435059	-0.00165	0.061543	-0.00085	0.290495	-0.00151	1
62	0.208894	0.003781	0.436709	-0.00166	0.062396	-0.00085	0.292001	-0.00127	1
64	0.205112	0.003608	0.438373	-0.00166	0.063243	-0.00083	0.293271	-0.00112	1
66	0.201504	0.00358	0.440036	-0.00135	0.064072	-0.00077	0.294387	-0.00146	1
68	0.197924	0.003269	0.441387	-0.00159	0.064841	-0.0008	0.295848	-0.00088	1
70	0.194655	0.003218	0.442976	-0.00143	0.065646	-0.00076	0.296724	-0.00103	1
72	0.191436	0.003227	0.444407	-0.00104	0.066405	0.001072	0.297752	-0.00326	1
74	0.188209	0.002938	0.445451	-0.00136	0.065333	-0.00072	0.301007	-0.00085	1
76	0.185272	0.002859	0.446815	-0.00129	0.066052	-0.0025	0.301862	0.000924	1
78	0.182413	0.002661	0.448101	-0.00142	0.068548	0.001091	0.300938	-0.00233	1
80	0.179752	0.002803	0.449524	-0.0008	0.067457	-0.00061	0.303267	-0.00139	1
82	0.176948	0.022136	0.450325	-0.0186	0.068065	-0.00456	0.304662	0.001022	1
100	0.154812		0.468923		0.072626		0.303639		1

<표 3>, <표 4>, <표 5>, <표 6>의 결과를 가지고 성장률 변동에 따른 비용모형의 특성을 분석하면 다음과 같다.

치어비용을 살펴보면 총비용에서 차지하는 비중이 생존율 100%일 경우 15.5%(최적해 기준 15.5%)

에서 생존율 52%일 경우 23.0%(최적해 기준 29.8%) 정도를 차지하여 총비용에서 차지하는 비중이 100% 최적해 기준으로 보면, 수식에서의 성격에서와 같이 선형의 관계로 증가하는 것으로 나타나며, 개별 총비용에서 차지하는 비중도 생존율이 낮아지면서 15%에서 23%로 높게 나타난다. 이것으로부터 생존율은 낮아질수록 총비용에서 차지하는 비중이 커짐을 알 수 있다. 이 결과를 보면 치어비용은 증감율의 변동으로 보아도 다른 비용보다 크게 나타나는 것을 보아 알 수 있다.

분조비용을 살펴보면 총비용에서 차지하는 비중이 생존율 100%일 경우 7.26%(최적해 기준 7.26%)에서 생존율 52%일 경우 5.78%(최적해 기준 7.46%) 정도를 차지하여 100% 기준 최적해 기준으로 큰 차이가 없으며, 개별 생존율 기준으로 보면 전체 비용에서 차지하는 비중이 2% 이내로 매우 적게 나타나고 있다. 이것은 생존율을 변동시키면서 최종양식무게를 일정하게 하도록 시뮬레이션 하였으므로 양식시간이 지나갈수록 같은 양식무게를 가지게 됨에 따라 나타난 결과이다. 만약 투입 치어수를 일정하게 하고 생존율을 변동시킨다면 양식기간 동안의 분조비용은 좀 더 크게 늘어날 것으로 생각된다. 하지만 생존율 100%일 경우 분조비용이 7.26% 정도를 차지하는 것으로 보아 밀식을 하지 않는 경우라면 큰 변동은 없을 것으로 판단된다.

수조비용을 살펴보면 총비용에서 차지하는 비중이 생존율 100%일 경우 30.4%(최적해 기준 30.4%)에서 생존율 52%일 경우 28.5%(최적해 기준 36.8%) 정도를 차지하여 100% 기준 최적해 기준으로 보면 30.4%에서 36.8%로 6.4% 정도 증가하나 개별 생존율 기준으로 보면 30.4%에서 생존율 52%일 경우 28.5%로 1.9%로 감소하고 있다. 이를 보면 수조비용은 생존율이 감소함에 따라 증가하지만 그 증가폭은 치어비용보다는 낮게 나타난다는 것을 알 수 있다. 개별 생존율의 경우에 차지하는 비중도 총비용의 변동과 비슷한 정도로 증가한다는 것을 볼 수 있다. 수조비용 증분의 변동을 보면 다른 비용요소보다 변동이 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 성장함수가 비선형함수인 영향으로 분석된다.

사료비용을 살펴보면 총비용에서 차지하는 비중이 생존율 100%일 경우 46.9%(최적해 기준 46.9%)에서 생존율 52%일 경우 42.7%(최적해 기준 55.1%) 정도를 차지하여 전체 비용에서 차지하는 비중이 제일 크게 나타나고 있다. 100% 기준 최적해 기준으로 보면 46.9%에서 55.1%로 8.2% 정도 증가하고, 개별 생존율 기준으로 보면 46.9%에서 생존율 52%일 경우 42.7%로 4.2% 감소하고 있다. 이를 보면 사료비용은 생존율이 감소함에 따라 증가하지만, 그 변동폭은 치어비용보다는 낮고 수조비용보다는 높게 나타난다는 것을 알 수 있다. 증분을 살펴보면 100% 기준 최적해 기준으로 보면 증분은 0.0034에서 0.0065로 지속적으로 증가하나 개별 생존율의 경우 증분의 변동은 생존율 78%와 생존율 72% 생존율 68% 등에서 변곡점이 나타나고 있는 것을 볼 수 있으며, 60% 이하에서는 증분이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 사료비용 증분의 변동을 보면 다른 비용요소보다 변동이 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 사료비용이 생존율함수와 성장함수의 곱으로 나타나기 때문인 것으로 분석된다. 만약 성장률의 함수가 변동한다면 이에 따른 영향은 더욱 클 것으로 생각된다.

이상의 생존율의 변동에 따른 결과를 종합하면 다음과 같다.

첫째, 비용의 절대적 크기는 사료비용, 수조이용비용, 치어비용, 분조비용 순이다.

둘째, 생존율의 변동에 따라 비용의 변동이 가장 큰 비용항목은 치어비용이며, 그 다음은 사료비용, 수조비용, 분조비용 순이다.

셋째, 생존율의 변동에 따라 비용변동의 비선형성이 나타나는 항목은 사료비용과 수조이용비용이다. 이러한 결과를 보면 양식초기의 생존율보다 양식이 어느 정도 이루어진 이후의 생존율이 비용측면에서 더욱 중요함을 알 수 있다.

IV. 결 론

어류양식에서 가장 중요한 관리의 대상이 되는 것은 양식 생존율이다. 양식에서 생존율을 높이는 것은 양식장 시설의 이용률을 높이고 사료효율을 좋게 하여 양식장의 수익을 높이는 데 매우 중요한 관리적 요소이다.

본 연구는 육상 수조 양식장에서 양식어류의 생존율과 관련된 양식장 이용문제를 분석하였다. 본 연구에서는 양식 어류의 생존율에 대한 문제를 임계양식중량으로 나타나는 생물적인 부분과 수조분조비용과 수조유지비용 치어비용 그리고 사료비용 등의 경제적인 부분으로 나누고, 생물적 양식조건과 이와 관련된 비용문제를 결합하여 비용방정식모형을 구축하였다. 본 연구에서 제시된 생존율에 연관된 이론적 모형에서는 의사결정변수를 양식기간과 연계된 분조횟수와 분조수를 의사결정변수로 하는 비선형 0-1 정수모형(Nonlinear 0-1 Integer Program)으로 구축하였다. 제시된 이론모형은 비선형으로 나타나는 성장률과 생존율의 함수와 이 함수와 연계된 비용함수들이 목적함수와 제약조건에서 나타나므로 일반해를 구하는 방법이 없다. 본 연구에서 이러한 유형의 복잡한 문제도 휴리스틱을 이용하여 문제의 해를 효과적으로 구할 수 있다는 것을 보여 주었다. 또한 제시된 이론적 모형의 성격을 분석하기 위하여 넓치 육상 양식장의 모의상황을 설정하고 모형을 구축하여 생존율의 변동에 따른 수치분석을 실시하였다.

본 연구의 주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 생존율에 대한 기존 연구에서는 단일 수조의 경우에만 적용이 가능한 모형이 제시되고 분석하였으나, 본 연구에서는 복수개의 수조를 이용하는 경우의 생존율과 성장률에 관련된 비용모형을 구축하고 분석하였다는 점이다. 기존의 문헌에서는 이러한 연구가 이루어지지 않았다는 점에서 연구기여도를 찾을 수 있다.

둘째, 본 연구에서 제시된 모형은 어떠한 형태의 생존율과 성장률 함수를 이용하여도 비용방정식모형의 구축이 가능하며 최적해도 구할 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 넓치 육상양식장의 모의상황에 대하여 이러한 해를 구하고 수치분석을 통하여 해의 성격을 살펴보았다.

셋째, 넓치 육상양식장의 양식모의상황에 따른 사례성격의 모형을 설정하고 생존율에 따른 시물레이션 수치분석을 하여 양식비용의 항목들이 어떻게 변동하는가를 분석하였다. 이를 통하여 현실 문제 의사결정 측면에서의 특성들을 분석하고 그 의미를 살펴보았다.

본 연구의 한계와 향후 연구과제는 다음과 같다. 첫째 본 연구에서 치어 입식시기에 따른 생존율의 변동과 이에 따른 비용의 변동을 분석하지 못하였다. 이러한 부분에 대한 분석이 되면 생산전략 수립에 유용한 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각한다. 둘째, 현실적용에 필요한 성장률함수, 생존율함수, 사료전환계수 등에 대한 생물학적 연구가 이루어진다면 이러한 변수와 연계된 현실성이 높은 경제적 비용모형의 구축이 가능할 것으로 생각된다. 앞으로 이러한 방향에서의 연구는 현실에서의 적용 측면에서 의미가 있을 것으로 생각한다. 셋째, 제시된 모형은 0-1 integer 프로그램 성격의 문제 즉, 정수 변수가 커지면 풀어야 하는 문제는 지수로 증가하기 때문에 효과적으로 분기하고 바운딩(bounding)방법을 찾아 해를 쉽게 구하는 방법이 중요하다. 이에 대해서는 추가적인 연구는 본 논문의 성격과 직접적인 관계는 없지만 계량경영학 측면에서 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- 어윤양 (2011), “넙치양식장 밀식에 따른 생산성에 관한 연구”, *수산경영론집*, 42 (2), 85 – 96.
- 어윤양 (2014), “양식장 이용에 따른 생산성에 관한 연구”, *수산경영론집*, 45 (2), 85 – 95.
- 어윤양 (2015), “어류양식장 생산계획에 관한 연구”, *수산경영론집*, 46 (3), 129 – 141.
- 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.
- 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.
- Halachmi, I. (2007), “Biomass management in recirculating aquaculture systems using queuing network,” *Aquaculture*, 262, 514 – 520.
- Jaw - Kai, W. and Junghans, L. (2000), “Optimizing Multi-stage Shrimp Production Systems,” *Aquacultural Engineering*, 22, 243 – 254.
- Kankainen M., Setälä, J., Berrill, I. K., Ruohonen, K., Noble, C. 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.
- Pascoe, S., Wattage, P. and Naik, D. (2002), “Optimal Harvesting Strategies : Practice versus Theory,” *Aquaculture Economic and Management*, 6, 19 – 208.
- Ruiz-Velazco, J. M. J., Estrada-Prez, M., Hernandez-Llamas, A., Nieto-Navarro, J. T. and Peña-Messina, E. (2013), “Stock model and multivariate Analysis for prediction of semi-intensive production of shrimp *Litopenaeus vannamei* as a function of water quality and management variable : A stochastic approach,” *Aquacultural Engineering*, 56, 34 – 41
- 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.
- Seginer, I. (2009), “Are Restricted Periods of Over - stocking of Recirculating Aquaculture Systems Advisable? A Simulation Study,” *Aquacultural Engineering*, 41, 194 – 206.
- Wee, H. M. and Law, S. H.(1999), “Economic production lot size for deteriorating items taking account of the time-value money,” *Computer & Operations Research*, 26, 545 – 558.