

양식장 이용에 따른 생산성에 관한 연구[†]

어 윤 양*
부경대학교 경영학부

Productivity of Aquaculture Facility Utilization

Youn-Yang Eh*

Division of Business Administration, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

Abstract

Fish stocking is important element of land-based aquaculture management. To maintain constant stocking rate considering biological and economic condition is a convenient strategy in intensive aquaculture.

This study is aimed to analyze the effect of over-stocking(more than aquaculture capacity) for certain periods of time. This study make the mathematical decision making model that finds the value of decision variable to minimize cost that sums up the water pool usage cost and sorting cost under critical standing corp constraint.

The proposed mathematical decision making model was applied to 12 sample combination of sorting cost and the number of fish on the Oliver flounder culture farms. If a immature fish can be sold for high price than farming cost, restricted over-stocking resulted in a improvement of economic performance. When extensive comparable biological and market data become available, analysis model can be widely applied to yield more accurate results.

Keywords : Aquaculture management, Over-stocking, Productivity analysis, Land based aquaculture system, Allocation problem

I . 연구의 배경

양식장 이용에 대한 연구는 양식공학에서

Gates와 Mueller(1975)의 초기 연구를 시작으로 다양한 양식 환경과 양식시스템을 대상으로 진행되었다. Bjørndal 등(2004)이 양식에 관련된 기

접수 : 2014년 9월 10일 최종심사 : 2014년 9월 19일 게재확정 : 2014년 9월 22일

[†] 이 논문은 2012학년도 부경대학교 연구년 지원사업에 의해 연구되었음.

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

존 OR논문 분석한 것을 살펴보면, 해상양식에 관련된 것이 대다수이며 육상양식장에 관련된 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 육상양식장의 연구 중 Halachmi(2007)는 네트워크분석을 이용하여 육상의 순환양식장을 어윤양(2014)은 비선형정수계획모형을 이용하여 육상양식장 운영에 대하여 분석한 바 있다.

육상양식장 운영에서 나타나는 주요한 특성 중의 하나는 단위 면적당 고정비가 크기 때문에 양식장의 효율성을 높이기 위해 양식장의 운영 통제를 매우 엄격하게 하고 시설 공급능력의 여유를 낮게, 즉 양식시설의 이용률을 높게 하는 것이 일반적이다. 이러한 이유로 육상양식장에서 양식시설의 한계를 초과하여 양식하는 경우가 많다.

어류양식에서 양식밀도는 일반적으로 단위 양식장 부피(면적)당 양식개체의 수 또는 양식 중량(no, weight/m³, m³)으로 정의된다. 이러한 양식밀도에 대한 정의를 기준으로 생각하면 시설 한계를 초과하여 양식하는 경우를 밀식(over stocking)이라고 할 수 있다.

밀식양식에 대하여 Brock(1992)와 LeaMaster (1992)는 고밀도 양식은 질병의 발병률을 높이고 적절한 양식밀도는 질병 발병률을 낮추므로 양식밀도가 질병발병률의 척도가 될 수 있다고 하였다. Fulks와 Main(1992)는 양식장 구조의 크기, 유수 속도 등과 같은 수관리시스템으로 양식 환경을 통제함으로써 양식밀도에 따른 발병률을 낮출 수 있다고 주장하였다. 기존 연구를 정리하여 보면, 양식공학의 측면에서 양식장에서 밀식을 하는 경우에 대한 부작용은 양식구조의 생체중량한계를 초과하여 양식하게 되면 생물 대사 작용에 따른 유해물질이 한계이상 발생하고 양식 환경이 나빠짐으로써 생존율이 하락하고 성장속도가 떨어진다는 것이다. 따라서 양식 공학에서 밀식과 관련된 주요한 연구는 유해물

질을 양식시스템에서 효과적으로 제거하여 어느 정도 밀식을 가능하게 할 것인가 하는 것에 초점을 맞추고 있음을 볼 수 있다". 그러나 양식 시스템을 아무리 효과적으로 만든다 하더라도 구축된 양식장 환경에서 양식어종의 무게총량(biomass)의 한계, 즉 임계 양식 총량(critical standing crop: CSC)을 넘겨 양식을 하게 되면 발병률이 높아지고 성장률이 낮아지게 된다. 따라서 양식 임계 총량에 가깝게 양식할수록 성장률이 낮아지므로 이론적으로 밀식은 바람직하지 못하다. 이러한 임계 양식 총량은 양식공간의 한계가 명확한 육상양식장에서 매우 중요한 양식 제약조건이라 할 수 있다. 밀식에 따른 문제에 대한 양식공학적인 연구는 타당성이 확보되었는데 반하여 실제 현실적으로 발생하고 있는 이유는 무엇인가? 이것은 다음과 같은 이유를 유추할 수 있다. 첫째, 양식장에서 밀식은 바람직하지 않지만 양식장의 임계 양식 총량을 지키면서 적절하게 잘 관리한다면 주어진 시설로 더 많은 양식을 할 수 있으므로 경제적으로 초과이익이 발생한다고 생각하기 때문이다. 이러한 현상에서 생각할 수 있는 것은 임계 양식 총량을 지키면서 초과양식을 하는 경우도 밀식이라고 할 수 있을 것인가 하는 점이다. 양식기간 초기의 양식시설 여유를 이용한다는 점에서 이러한 양식형태는 현장에서 받아들여지고 있는 일반적 형태이다. 본 연구에서는 임계 양식 총량을 지키며 양식시설보다 많이 양식을 하는 경우를 초기 밀식으로 용어를 정의하여 사용하고자 한다. 둘째, 초기밀식의 경제적 효과에 대한 구조적 연구가 진행되지 않아 의사 결정시 모호성이 크기 때문이다.

본 연구에서는 초기밀식문제와 관련하여 다음과 같은 문제를 분석하고자 한다.

첫째, 양식기간이 한정되어 있는 육상양식장의 경우, 양식에 관련된 OR모형을 구축하고 이

1) Ido Seginer et al.(2008), Ido Seginer(2009) 논문을 참조하기 바람.

러한 OR모형을 기초로 하여 초기밀식에 대한 상황을 설정하고 시뮬레이션을 실시하였다. 둘째, 시뮬레이션 결과를 이용하여 초기밀식의 경제적 효과를 분석하고 밀식양식에 따른 생산성 분석을 하고자 한다. 이러한 연구의 결과는 밀식에 대한 이해력을 높일 뿐 아니라 앞으로 밀식연구에 대한 경제적 분석의 새로운 관점을 제시함으로써 향후 관련 연구에 대한 촉진제가 될 수 있을 것으로 생각한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. II장에서는 초기밀식양식에 따른 양식장의 생산성을 분석하는 모형을 구축하고 III장에서는 자료를 이용하여 모형의 시뮬레이션 결과를 기술하였으며, 마지막으로 IV장에서는 연구결과를 요약하면서 모형의 한계점과 앞으로의 연구에 대하여 언급하였다.

II. 모형의 설정

1. 모형의 가정과 변수의 정의

본 연구는 양식과 관련된 비용 요소를 분석하고 비용 요소를 합하여 총비용을 분석하는 총비용접근방법으로 분석하고자 한다. 대상이 되는 양식장은 복수개의 수조시설을 가지고 있는 육상 양식장을 대상으로 하였다.

본 연구는 다음과 같이 가정하였다. 첫째, 육상양식장에서 발생하는 비용은 수조를 양식하기 위해 이용하는데 발생하는 수조유지비용(maintenance cost), 수조 양식 어류의 과밀에 따른 분조비용(set up cost for dividing), 양식 사료비용(cost of feeding), 양식장 관리비용(operating cost)이며 각 비용요소는 파악할 수 있다고 가정한다. 이는 실제 양식장에서 추정 가능하기 때문에 엄격한 가정이 아니다. 둘째, 양식장의 양식 마리수와 관계없이 임계 양식 총량(critical standing corp: CSC)에 도달하기 전 분조를 하면 생존율은 변하지 않는다고 가정한다. 이 가정은

수조에서 임계 양식 총량(critical standing corp: CSC) 이상으로 양식을 하지 않으면 생존율은 양식하는 어류의 생체중량의 함수라는 것을 의미한다. 적정 양식밀도라는 것은 특정 양식장 환경 조건하에서 그 조건에 적합한 양식장 밀도로 정의하는 것이 타당한 개념이다. 이는 곧 양식장 환경이 양식장에서의 임계 양식 총량에 영향을 준다는 것을 의미한다. 그러므로 생존율은 양식밀도와 밀접한 관계를 가지며, 적정 양식밀도는 임계 양식 총량의 범위 내의 양식밀도이다. 셋째, 양식기간은 한정되어 있으며, 양식기간 동안 개별 어류의 생체중량은 감소하지 않는다. 어류의 성장에 대한 모든 연구는 어류 중량이 시간의 흐름에 따라 증가하는 것으로 가정하고 있다. 넷째, 수조를 분조하는 경우 수조 단위 부피당 분조 마리 수는 동일하게 한다. 이 가정은 수학적 모형해법의 단순성을 확보하기 위한 것이다.

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

w : 양식 어류의 개체 무게(g/single fish)

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

W : 양식수조 내 양식 어류 전체의 생체중량(g/fish[pool])

W_i : 번째 수조 내에 있는 어류의 생체중량

W_{csc} : 수조 내에 있는 어류의 임계 양식 총량(CSC)

N : 전체 양식개체의 수

n : 개별 수조안에 있는 양식개체의 수

D : 수조 분조비용

d : 개별 수조 분조비용

M : 수조 유지비용

m : 단위 기간당 수조유지비용

F : 사료비용

c : 개체 무게($w(t)$)에 따른 사료비용(unit cost of feed per fish weight : \$/fish weight)

p : 양식수조의 수

- i : 수조의 일련 번호(1, 2, ..., p)
- j : 분조의 횟수 번호(1, 2, ..., k)
- t : 양식기간
- τ : 양식가능 기간

2. 이론적 모형의 구축

Von Bertalanffy²⁾ 연구 이후 기존의 어류 성장에 관련된 연구에서 나타나는 표현식은 곱의 형태나 합의 형태로 대부분 표현되었으며, 성장 관련 변수로 이용된 변수는 성장률(G), 현재상태의 크기(w), 양식장의 수온(T), 양식기간(t), 사료(Z) 등이 있다. 이를 일반적인 함수 표현식으로 나타내면 식 (1)과 같다³⁾.

$$G \equiv \frac{dw}{dt} = f(w, T, Z, t) \quad (1)$$

양식을 하면서 수온을 통제하지 않고 사료를 성장에 필요한 만큼 최적으로 공급한다면 성장률은 시간과의 함수관계로 표현 가능하고 양식 어류 개체의 무게는 식 (2)와 같은 시간의 함수로 표현된다.

$$w = f(t) \quad (2)$$

기간 t 에 양식수조(i)에 있는 양식 어류의 총무게(W_i)는 양식 어류 개체수(n)와 개별 양식 어류의 크기와의 곱의 형태로 나타나며 임계 양식 총량보다 작아야 한다.

$$W_i = n \cdot w(t) \leq W_{csc} \quad (3)$$

사료비 c 는 양식기간 t 에 따른 w 의 함수이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

다수개의 수조를 이용하여 양식하는 경우, 수조를 이용하는 정책에 따른 사료비 변동이 없다. 왜냐하면 사료 양은 최종 생체무게(w)에 비례하

기 때문이다. 그러므로 수조이용방법에 따라 달라지는 비용은 분조에 따르는 비용과 수조이용기간에 따라 발생하는 수자원 이용비용이다.

j 번째 분조를 수조 i 에서 분조한다면 수조의 이용비용은 $j \cdot 1$ 번째 분조를 할 때 이루어진 i 개의 이용기간에 따라 발생한다. $j \cdot 1$ 번째 수조를 분조를 한 후 j 번째 수조를 분조할 때까지 수조를 이용하는 시간은 개별수조 안의 N/i 마리의 생체중량 W 가 W_{csc} 될 때까지의 시간에서 $j \cdot 1$ 단계까지 수조 이용 시간을 제외한 시간이다. $j = 1$ 분조는 수조 1에서 시작하는 초기 값이므로 전체 개체 N 의 개체중량 W 가 될 때까지의 시간이다.

처음 수조에 입식 후 수조를 처음 분조할 때까지 걸리는 시간(t_0)은 처음 수조에 입식한 치어 N 이 자라서 수조 임계양식총량(W_{csc})까지 자라는 시간이다. 그러므로 최초 분조까지 수조이용시간은 식 (5)과 같다. 이때의 수조이용비용(M_0)은 첫 수조의 양식기간(t_0) 동안 이용하게 되므로 이용 기간에 1개 수조의 이용비용(m)에 양식기간을 곱한 값과 같다.

$$t_0 = f^{-1}(W_{csc}/N) \quad (5)$$

$$M_0 = m \cdot t_0 \quad (6)$$

수조를 $j=2$ 분조할 때까지 걸리는 시간(t_1)은 수조에 입식한 치어($N/i_{j=1}$)가 자라서 수조 임계양식총량(W_{csc})까지 자라는 시간이다. 이때의 수조이용비용($M_{1, i_{j=1}}$)은 수조 $i_{j=1}$ 개가 양식기간($t_1, i_{j=1} - t_0$) 동안 이용하게 되므로 이 양식기간에 수조의 이용비용(m)을 곱한 값과 같다.

$$t_{1, i_{j=1}} = f^{-1}(i_{j=1} \cdot W_{csc}/N) \quad (7)$$

$$M_{1, i_{j=1}} = m \cdot (t_{1, i_{j=1}} - t_0) \cdot (i_{j=1}) \quad (8)$$

수조를 $j=\lambda + 1$ 분조할 때까지 걸리는 시간($t_{j=\lambda}$)은 수조에 입식한 치어($N/i_{j=1}$)가 자라서 수조 임계양식총량(W_{csc})까지 자라는 시간이다. 그러

2) <http://www.fao.org/docrep/w5449e/w5449e05.htm>의 성장률 측정에 대한 연구 참조.
3) 수학적 모형에 대한 내용은 어윤양(2014)을 참조.

므로 분조까지 수조이용시간은 식 (9)와 같다. 이때의 수조이용비용($M_{\lambda, i_j=\lambda}$)은 수조 ($i_j=\lambda$)개가 양식기간($t_{\lambda, i_j=\lambda} - t_{\lambda-1, i_j=\lambda-1}$) 동안 이용하게 되는 비용으로 식 (10)과 같다.

$$t_{\lambda, i_j=\lambda} = f^{-1}(i_j=\lambda \cdot W_{\text{csc}}/N) \quad (9)$$

$$M_{\lambda, i_j=\lambda} = m \cdot (t_{\lambda, i_j=\lambda} - t_{\lambda-1, i_j=\lambda-1}) \cdot (i_j=\lambda) \quad (10)$$

$i_j=\lambda=p$ 인 경우에, 즉 분조 후 수조 전체에 분조되면 더 이상 분조할 필요가 없는 경우 수조이용시간은 식 (11)로 나타나고, 이때의 수조이용비용은 식 (12)와 같다.

$$t_{\lambda, i_j=\lambda=p} = f^{-1}(i_j=\lambda=p \cdot W_{\text{csc}}/N) \quad (11)$$

$$M_{\lambda, i_j=\lambda=p} = m \cdot (\tau - t_{\lambda, i_j=\lambda=p}) \cdot p \quad (12)$$

$j=\lambda$ 번째, 즉 분조 $i_j=\lambda-1$ 에서 $i_j=\lambda$ 개로 분조하였다고 하면 분조비용은 $d \cdot i_j=\lambda$ 가 되고, 분조에 대한 제약조건은 $i_j=\lambda-1$ 의 수조에서 분조하였으므로 $i_j=\lambda-1$ 보다 크고 전체 수조의 수보다는 적어야 한다.

$$i_j=\lambda-1 < i_j=\lambda \leq p \quad i_j=\lambda \in (i_j=\lambda-1 + 1, p), i, j = \text{정수} \quad (13)$$

만약 분조 후 양식수조 p 개를 한 후 양식기간이 τ 가 되지 않았다면 W_{csc} 가 넘게 되므로 분조비용은 p 개가 더 발생하게 되고, 적정 개체 중량이 되기 전에 분조, 즉 이 경우에는 조기출하를 위한 분조를 하여야 한다.

이상의 관계를 정리하여 모형을 구축한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= \sum_{j,i} (M_{j, i_j=\lambda} + s \cdot i_j=\lambda) + m \cdot (\tau - t_{j,p}) \cdot \\ & p + p \cdot d \cdot (1-y) \\ \text{subject to} \\ M_{j, i_j=\lambda} &= m \cdot (t_{j, i_j=\lambda} - t_{j-1, i_j=\lambda-1}) \cdot (i_j=\lambda) \quad \lambda \in (1, \lambda^0) \\ t_{j, i_j=\lambda} &= f^{-1}(i_j=\lambda \cdot W_{\text{csc}}/N) \quad \lambda \in (1, \lambda^0) \\ \sum_{j,i} t_{j-1, i_j=\lambda-1} + (\tau - t_{j,p}) \cdot (1-y) &= \tau \quad \lambda \in (2, \lambda^0) \end{aligned}$$

4) 발견적 방법은 어윤양(2014)을 참조하기 바람.

$$\begin{aligned} \tau - t_{j,p} &\leq BM \cdot (1-y) \\ -x &\leq BM \cdot y \\ i < i_j=\lambda-1 < i_j=\lambda &\leq p \quad i_j=\lambda \in I(1, p), \lambda \in I(2, \lambda^0) \\ i_j=\lambda^0 &= p \\ i_j=0 &= 1 \\ t_0 &= f^{-1}(W_{\text{csc}}/N) \\ M_0 &= m \cdot t_0 \\ W_{\text{esc}}, d, p &= \text{constant} \\ j, i &: \text{integer} \\ x, y &: 0 \cdot 1 \text{ variable} \\ BM &: \text{big M value} \end{aligned}$$

위 이론적 수학 모형을 보면, 변수가 $0 \cdot 1$ 정수이고 비선형 제약조건을 가지고 있어 미적분을 이용하는 해법을 이용할 수 없으며, 문제의 복잡성으로 인하여 완전해(closed-form solution)를 구하기 어려워 열거법(enumeration method)이나 가지치기 계산절차(branch and bound algorithm)를 적용하여 해를 구하여야 한다. 이 경우 p 값이 커지면 비교하여야 하는 해의 수가 지수로 증가하기 때문에 최적해를 구하기가 어려워진다. 문제의 성격을 분석하면 수조 분조의 수와 수조이용의 관계는 역의 관계이므로 이를 이용하여 효과적으로 해를 구하는 발견적 방법을 생각할 수 있다⁴⁾. 본 연구에서는 수치적 분석을 위하여 기존연구에서 제시된 가지치기 계산절차를 이용하였다.

III. 모형의 수치분석

1. 모형의 수치계산 결과 분석

본 장에서는 밀식과 관련된 모형으로부터 보다 많은 시사점을 찾기 위해 기본모형을 기반으로 하여 수치분석(numerical analysis)를 수행하여 밀식의 정도에 따른 변화를 시뮬레이션하였다. 밀식에 대한 분석을 위하여 밀식의 정도(N)는 4개의 모수로, 비용에 대한 모수(s)는 3개의

모수로 연구를 수행하였다. 비용에 대한 모수는 양식장 수조 1개에 대한 수조유지비용(m)을 하루에 a 만큼 발생하는 것으로 하고, 분조비용은 수조이용비용에 대비하여 $4a, 8a, 12a$ 로 설정하였다. 양식기간 τ 는 298일이다. 이 값은 수조용량에 적합한 치어를 넣었을 경우 수조 수 $p=15$ 에 분조를 할 때까지의 양식기간이다. 초기밀식을 하는 경우 $p=15$ 에 분조하는 시간 W_{csc} 를 초과하기 때문에 적절한 크기로 성장하지 못한 양식 어류를 출하하여야 하므로 이를 기준으로 한 것이다. 이에 따라 12가지 밀식에 따른 상황이 제시되었으며, 연구에서 이용된 제시 모형의 상수와 모수, 그리고 성장함수는 다음 Table 1과 같다⁵⁾.

Table 1에서 제시된 자료를 중심으로 상황에 따른 시뮬레이션 한 결과는 다음 Table 2와 같다. Table 2에서의 각 모의 상황에 대한 해는 다음과 같이 해석할 수 있다. 예를 들어 치어 N_0 을 양식

할 때 분조비용(s)가 $4a$ 인 경우, 분조는 한 개의 수조에서 48일을 양식한 후에 2개로 분조한 후 일곱 번 15개 수조까지 분조할 경우 총비용은 $2066a$ 가 발생한다는 것이다.

Table 2에서 나타난 해의 성격을 보면 치어수 증가와 관계없이 분조비용이 증가할수록 분조 횟수가 줄어드는 것을 알 수 있으며, 분조하는 간격은 치어수가 증가할수록 줄어드는 것을 알 수 있다. 수치분석의 결과를 이용하여 추가적인 분석을 수행하면 다음과 같은 특성을 살펴볼 수 있다. 먼저 치어 수 증가에 따른 양식 총비용의 증가는 Table 3에서 같이 N_0 에서 N_1 으로 증가할 경우에 가장 크게 증가하고, 분조비용이 증가할수록, 즉 $4a$ 에서 $8a, 12a$ 로 커질수록 증가폭이 커짐을 볼 수 있다. 이러한 결과는 적정 양식규모로 양식하는 경우보다 더 양식하는 경우 비용이 급격하게 증가하며, 분조비용이 커질수록 그 증

Table 1. Parameters, constant and growth function

Parameters	m	s_1	s_2	s_3	N_0	N_1	N_2	N_3
Value	a	$4a$	$8a$	$12a$	10000	11000	12000	13000
Constant, function	p	τ	W_{csc}	$w(t)$				
value	15	298day	500kg	$w(t) = -6.4278 + 1.1576t - 0.00077t^2 + 0.000018t^3$				

Table 2. Optimal solution of models

No. of fish(N)	Dividing No.	Dividing cost(s)	Cost according to dividing number								Added cost	Total cost
			0	1	2	3	4	5	6	7		
N_0	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 12 · 15	4a	48	132	240	505	785	1091	1571	2066		2066
	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	8a	48	140	260	545	853	1363	2263			2263
	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	12a	48	148	280	585	921	1471	2431			2431
N_1	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 12 · 15	4a	44	124	226	481	761	1049	1517	2012	(255)	2267
	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	8a	44	132	246	521	829	1319	2204		(315)	2519
	1 · 2 · 4 · 6 · 10 · 15	12a	44	140	408	726	1426	2371		1968	(375)	2746
N_2	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 12 · 15	4a	41	115	214	459	732	1020	1488	1925	(420)	2388
	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	8a	41	123	234	499	800	1290	2160		(480)	2640
	1 · 2 · 4 · 6 · 10 · 15	12a	41	131	391	703	1393	2323			(540)	2863
N_3	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 12 · 15	4a	38	108	204	444	710	989	1445		(570)	2495
	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	8a	38	116	224	484	778	1248	2118		(630)	2748
	1 · 2 · 4 · 7 · 10 · 15	12a	38	124	376	845	1355	2285			(690)	2975

5) 성장함수는 어윤양(2011)의 연구에서 제시된 함수임.

Table 3. Cost according to no. of fish and dividing cost (unit : a)

Dividing cost \ No. of fish	N_0	N_1 (increase of cost)	N_2 (increase of cost)	N_3 (increase of cost)
4a	2066	2267(201)	2388(121)	2495(107)
8a	2263	2519(256)	2640(121)	2748(108)
12a	2431	2746(315)	2863(117)	2975(112)

Table 4. Total cost of N_i vs N_0 (unit : a)

Dividing cost \ No. of fish	N_0	N_1 (increase of cost)	N_2 (increase of cost)	N_3 (increase of cost)
4a	2066	2267(9.73%)	2388(15.59%)	2495(20.77%)
8a	2263	2519(11.31%)	2640(16.66%)	2748(21.43%)
12a	2431	2746(12.96%)	2863(17.77%)	2975(22.38%)

Table 5. Profit/Cost according to early shipment (unit : a)

No. of fish	Profit/Cost			Added cost of farming		
	Time(day)	$w(t)$	$IC(N_i)$	4a	8a	12a
N_0	298	746.4576	—	—	—	—
N_1	285	677.5842	$IC(N_1)$	201	256	315
N_2	274	623.1759	$IC(N_2)$	322	377	432
N_3	264	576.6631	$IC(N_3)$	429	485	544

가가 커짐을 볼 수 있다.

적정규모를 초과하여 양식하는 경우, 초과에 따른 양식비용의 증가와 총양식비용의 증가는 다음 Table 4와 같다.

Table 4에서 보면 총비용의 증가는 분조비용이 증가할수록 증가비율이 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 적정 치어 수보다 많이 양식하는 경우 양식장 유지비용보다 분조비용이 높을수록 더 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다.

적정한 수준으로 치어를 입식한 경우와 초과하여 입식한 경우 발생하는 비용의 차이는 분조비용, 양식유지비용, W_{esc} 를 초과하기 때문에 적정한 크기로 성장하지 못한 양식 어류($N_i - N_0$)를 출하하는데 따른 판매수익의 감소, 즉 상품비용(item itself cost: $IC(N_i)$) 때문에 발생한다. 상품비용은 개별 양식출하 어종의 중량의 차이에 따른(출하가격/출하중량)의 차이 때문에 나타난다. 이 비용은 출하중량이 적을수록 단위 무게에 따른 가격이 낮으므로 크게 발생한다. 이 비용은

출하 중량에 따른 가격을 알 수 있을 경우 분석이 가능하다. 즉 출하무게 $w(t)$ 에 따른 출하가격을 함수 f 로 표시하면 $f(w(t))$ 가 되고, 초과양식($N_i - N_0$)출하에 따른 출하가격은 $(N_i - N_0) \times f(w(t))$ 으로 표시된다. $W_i(t) \equiv (N_i - N_0) \times w(t)$ 이다. 수조유지비용과 분조비용을 제외한 $w(t)$ 의 양식비용을 tc^0 이라고 하면 $TC^0 = tc^0 \times W(t)$ 로 표현할 수 있다. 그러므로 $(N_i - N_0)$ 양식 어류의 조기출하에 따른 수익/비용은 다음 식 (14)와 같이 나타난다.

$$IC(N_i) = (N_i - N_0) \times f(w(t)) - TC^0$$

- 수조유지비용 - 분조비용 (14)

$IC(N_i)$ 는 양식 마리수와 출하시의 무게 $w(t)$ 의 함수이므로 $g(N_i, f(w(t)))$ 로 표현이 가능하다.

식 (14)에 따르면 $IC(N_i)$ 의 값이 0이 되는 N_i 값이 밀식 가능한 손익분기점이 된다. 이에 대한 분석은 출하무게에 따른 가격만 알 수 있으면 가능하므로 제시된 모형이 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 제시된 자료만으로 분

석하여 보면, 분조비용 증가분은 비용에 미치는 영향보다 양식 마리 증가에 따른 비용이 약 2배 가까이 되는 것으로 나타나는데, 이는 초과 양식하는 경우의 비용증가가 더 크다는 것을 보여주고 있다. 적정증량에 도달하지 못한 경우, 출하가격이 낮을 때에는 이 비용이 레버리지 효과로 나타나 손실을 더 크게 할 수 있음을 보여준다.

이것은 초기밀식이 언제나 수익을 증대시키지는 않는다는 것을 보여주고 있다.

2. 모형의 민감도

본 연구에서는 분조비용의 세 가지 모의상황에 대하여 초기입식 치어수의 변화에 따른 해의 변화를 살펴보았다. 각 모의상황에 대하여 차선

Table 6. Optimal solution according to number of fish in case of dividing cost 4a (unit : a)

No. of fish	Type of solution	Dividing number	Total no. of dividing	Total cost		
				4a case	8a case	12a case
N ₀	optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 12 · 15	53	2066	2287	2511
	sub-optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 11 · 15	52	2074	2282	2490
N ₁	optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 11 · 15	52	2268	2536	2804
	sub-optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 12 · 15	53	2267	2539	2811
N ₂	optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 12 · 15	53	2388	2660	2932
	sub-optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 11 · 15	52	2393	2661	2929
N ₃	optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 9 · 12 · 15	53	2495	2767	3039
	sub-optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 8 · 10 · 13 · 15	56	2495	2767	3039

Table 7. Optimal solution according to number of fish in case of dividing cost 8a (unit : a)

No. of fish	Type of solution	Dividing number	Total no. of dividing	Total cost		
				4a case	8a case	12a case
N ₀	optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	42	2263	2095	2431
	sub-optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 8 · 11 · 15	44	2266	2090	2442
N ₁	optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	42	2519	2291	2627
	sub-optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 8 · 11 · 15	44	2519	2283	2635
N ₂	optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	42	2640	2412	2868
	sub-optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 8 · 11 · 15	44	2643	2407	2879
N ₃	optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	42	2748	2520	2976
	sub-optimal	1 · 2 · 4 · 7 · 11 · 15	39	2755	2547	2982

Table 8. Optimal solution according to number of fish in case of dividing cost 12a (unit : a)

No. of fish	Type of solution	Dividing number	Total no. of dividing	Total cost		
				4a case	8a case	12a case
N ₀	optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	42	2431	2095	2263
	sub-optimal	1 · 2 · 4 · 6 · 10 · 15	37	2432	2136	2284
N ₁	optimal	1 · 2 · 4 · 6 · 10 · 15	37	2746	2330	2538
	sub-optimal	1 · 2 · 3 · 5 · 7 · 10 · 15	42	2747	2291	2519
N ₂	optimal	1 · 2 · 4 · 6 · 10 · 15	37	2863	2447	2655
	sub-optimal	1 · 2 · 3 · 6 · 10 · 15	36	2870	2462	2666
N ₃	optimal	1 · 2 · 4 · 7 · 10 · 15	38	2975	2551	2763
	sub-optimal	1 · 2 · 4 · 7 · 11 · 15	39	2982	2547	2755

의 해와 각해에 대하여 분조비용의 변화에 따른 해의 변화를 정리한 것은 Table 6, Table 7, Table 8과 같다. 세 가지 모의상황 경우 전부다 최적해와 차선의 해 사이의 총비용차이는 크지 않음을 알 수 있다.

세 가지 모의상황에서 모두 최적 해와 차선의 해 사이 변화는 크지 않으나, 분조의 수는 4a인 경우가 가장 많고 분조횟수의 변화는 12a인 경우에 치어수가 적은 경우 가장 크게 나타남을 볼 수 있다. 분조비용이 변동하는 경우 분조비용이 4a인 경우를 가정하고 구한 최적 해가 분조비용이 변동함에 따라 가장 크게 변동함을 볼 수 있다. 분조비용을 4a로 가정하고 구한 해는 비용의 변동과 초기밀식의 수준에 따라 바뀌는 경우가 적고 바뀌는 경우에도 총비용의 차이는 적으나 8a와 12a인 경우 바뀌는 경우가 많고 최적 해와 차선 해의 총비용의 차이도 큰 것을 볼 수 있다.

또한 분조비용변화에 따른 변동은 4a로 최적해를 구한 경우가 8a, 12a인 경우보다 총비용이 크게 변동하였다. 이러한 사실은 분조비용이 클수록 분조비용의 변동에 따른 총비용의 변화가 적게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이것은 분조비용이 높을수록 해의 안정성이 높게 나타나는 것을 의미한다.

이상 모든 경우에서 분조비용의 크기가 분조 경로를 결정하는 데 큰 영향을 크게 미치며, 초기밀식의 크기는 분조 경로보다는 수조를 전부 이용하는 기간을 길게 하므로 비용에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 양식장 수조를 효과적으로 이용하는 것이 총비용을 줄이는 데 무엇보다 중요하며 수조 분조를 적절하게 하지 않는 경우 분조비용의 변화에 따른 총비용의 증가는 제일 크게 나타나는 것을 Table 6과 Table 8을 비교하여 봄으로써 알 수 있었다.

IV. 결 론

의도적인 밀식은 양식장 시설의 이용률을 높

여 사료효율문제나 생존율의 문제가 발생함에도 불구하고 양식장의 수익을 높이기 위하여 현실에서 많이 이루어지고 있다. 양식장의 이용률을 높이기 위하여 양식장 수조의 임계양식증량을 지키며 분조를 하는 경우의 초기밀식은 양식장 수익을 높일 수 있는 가능성이 크다.

본 연구는 양식어업 중 육상 수조 양식장의 초기밀식과 관련하여 양식장 이용문제를 분석하였다. 본 연구에서는 밀식에 대한 문제를 임계양식증량으로 나타나는 생물적인 부분과 수조분조비용과 수조유지비용으로 나타나는 경제적인 부분으로 나누어 모형을 구축하였다. 본 연구에서 제시된 초기밀식에 대한 이론적 모형에서는 의사결정변수를 비선형변수인 양식기간으로 하지 않고 양식기간과 연계된 분조횟수와 분조수를 의사결정변수로 하는 비선형 0-1 정수모형(Nonlinear 0-1 Integer Program)으로 구축하였다. 이와 같은 문제는 많은 수의 비선형적 변수와 고정비용, 가변비용을 모형에서 다루어야 하므로 동태적 형태로 정수 및 이진변수가 나타나 계산이 복잡하기 때문에 기존의 수리적 해법으로는 해결이 곤란하다. 그런데 이러한 복잡한 문제에서도 휴리스틱을 이용하여 쉽게 해결할 수 있다는 것을 보여주었다. 또한 제시된 이론적 모형의 특성과 설명력 그리고 현실에서의 적용가능성을 분석하기 위하여 넓치 육상 양식장의 모의상황을 설정하고 수치분석을 실시하였다.

본 연구의 주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 밀식에 대한 기존 연구에서는 단일 수조의 양식장 환경 통제에 초점을 맞추어 밀식에 대한 모형을 구축하고 분석하였으나, 본 연구에서는 성장함수를 적용하고 다수 개의 수조를 이용하는 경우의 밀식에 관련된 모형을 구축하고 분석하였다는 점이다. 기존의 문헌에서는 이러한 주제가 다루어지지 않았다는 점에서 연구기여도를 찾을 수 있다.

둘째, 초기밀식의 정도와 초기밀식을 할 경우 최적의 분조 및 양식방법을 결정하기 위한 비용

방정식 모형은 구축 가능하며 최적해도 구할 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 넙치 육상양식장의 모의상황에 대하여 해를 구하고 해의 성격을 살펴보았다.

셋째, 단조증가형태의 비선형 문제를 포함하는 모형의 해를 구하기 위하여 분단탐색법(branch and bound method)의 개념을 기반으로 한 휴리스틱을 이용하여 최적해를 구하고 모형과 연계된 의사결정 정보를 얻을 수 있다는 것을 보였다는 점이다.

넷째, 넙치 육상양식장의 문제에 대한 모의상황을 설정하고 초기밀식의 정도와 분조비용 및 유지비용의 변화에 따른 시뮬레이션 수치분석을 이용하여 의사결정 변수의 성격이 어떻게 나타나는가를 분석하였다. 이를 통하여 현실문제 적용차원에서의 모형 유용성을 입증하였다.

본 연구의 한계와 향후 연구과제는 다음과 같다. 첫째 본 연구에서 생존율은 변화가 없다고 가정하였는데, 이러한 모형의 가정을 완화시켜 모형화한다면 더욱 타당한 모형을 구축할 수 있을 것이다. 둘째, 현실에서 모형의 유용성을 높이기 위해서는 모형 적용에 필요한 적절한 성장함수, 분조비용, 수조이용비용, 생체중량에 따른 가격에 대한 자료의 측정이 중요하다. 이러한 비용과 수익에 대한 측정을 통하여 현실에서의 적용연구가 이루어져야 할 필요가 있다. 또한 개별 양식장에 대한 적용이 쉬워야 하므로 간편한 적용 방법의 개발도 필요할 것으로 생각된다. 셋째, 알고리즘 측면에서 0-1 integer 프로그램 성격의 문제는 변수가 커질수록 문제의 수가 매우 커진다는 점이다. 계산을 줄이면서 해를 효율적으로 구하기 위한 효과적 바운딩(bounding)방법의 개선이 필요하다. 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

Bjørndal, T., Lane, D. E., 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.
- Brock, J. A. (1992), “Current Diagnostic Methods for Agent and Diseases of Farmed Marine Shrimp,” In: Fulks, W. & K. L. Main(Eds), *Diseases of cultured Penaeid Shrimp In asia and the United States*. The Oceanic Institute, HI, 209–232.
- Cerrato, R. M. (1990), “Interpretable Statistical Tests for Growth Comparisons Using Parameters in Von Bertalanffy Equation,” *J. Fish. Aquat. Sci.*, 47, 1416–1426.
- Eh, Y. Y. (2011), “Environmental Effects on Productivity of Flounder Culture Farms,” *The Journal of Fisheries Business administration*, 44 (3), 79–94.
- 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
- Fulks, W. and Main(Eds), K. L. (1992), “Diseases of cultured Penaeid Shrimp In asia and the United States,” The Oceanic Institute, HI, 209–232.
- 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.
- Jaw · Kai, W. and Junghans, L. (2000), “Optimizing Multi · stage Shrimp Production Systems,” *Aquacultural Engineering*, 22, 243–254.
- Kirkwood, G. P. (1983), “Estimation of Von Bertalanffy Growth Curve Parameters Using Both Length Increment and Age · length Data,” *Can. J. Fish.*

- Aquat. Sci.* 40, 1405 – 1411.
- LeaMaster, B. (1992), “Shrimp Health Management Procedures,” In: Fulks, W. & K. L. Main(Eds), *Diseases of cultured Penaeid Shrimp In asia and the United States*. The Oceanic Institute, HI, 345 – 356.
- 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.
- Seginer, I., Mozes, N. and Lahav. (2008), “A design study on the optimal water refreshment rate in recirculating aquaculture systems,” *Aquacultural Engineering*, 38, 171 – 180.
- Seginer, I. (2009), “Are Restricted Periods of Over · stocking of Recirculating Aquaculture Systems Advisable? A Simulation Study,” *Aquacultural Engineering*, 41, 194 – 206.
- <http://www.fao.org/docrep/w5449e/w5449e05.htm>
- <http://fsfips.go.kr/fc/main.jsp>