JFMSE, 26(2), pp. 444~454, 2014.
수산해양교육연구, 제26권 제2호, 통권68호, 2014.
www.ksfme.or.kr
http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2014.26.2.444

양식장 이용에 대한 수학적 모형

어 윤 양†
(부경대학교)

Mathematical Model of Aquaculture Facility Utilization

Youn-Yang EH†
(Pukyong National University)

Abstract

The range of optimization problem in aquaculture is very wide, resulting from the range of species, mode of operation. Quite a few studies focus marine net-cages, but studies on land based culture farm are few or no. This paper considers a allocation problem to meet production planning in land based aquaculture system. A water pool allocation model in land based aquaculture system was developed. The solution finds the value of decision variable to minimize yearly production costs that sums up the water pool usage cost and sorting cost.

The model inputs were (1) the fish growth rate (2) critical standing corp (3) number of water pool (4) number of fish. The model outputs were (5) number of water pool in growing phase (6) cost of cultivation (6) optimal facility allocation(number of water pool for each growing phase). To solve the problem, an efficient heuristic algorithm based on a greedy manner is developed. Branch and bound and heuristic is evaluated through numerical examples.

Key words : Aquaculture management, Production scheduling, Growth rate of fish, Land based aquaculture system, Allocation problem

Ⅰ. 연구의 배경

어류양식에서 수리계획법 적용과 관련된 연구는 여러 종류의 어종, 어장, 그리고 환경조건을 고려하여 다양하게 이루어져 왔다. 연구대상인 어장유형에 따라 구분하면 다수의 연구들이 해상양식장에 대하여 이루어졌고(Forsberg, 1996; Forsberg and Guttorman, 2006; Hernandez et al., 2007; Seginer and Halachmi, 2008) 양식장은 집중양식장(intensive aquaculture farm)에 대한 연구가 대부분 이었다. 육상양식장에 대한 연구는 순환여과식 양식장(recirculating aquaculture system : RAS)인 경우의 연구(Halachmi et al., 2005; Halachmi, 2007)가 대부분이었으며 육상에서의 집중양식(intensive aquaculture)에 대한 연구(Yi, 1998)도 소수 이루어졌다.

양식 문제에 적용된 수리계획 방법들도 다양다기하다. 연구방법의 대부분은 최적화 모형이었으며 시뮬레이션 모형(Tien et al., 2000)도 보완적인 방법으로 이용되었다. 최적화 모형 중 동적계획법(Hernandez et al., 2003), 마아코브 프로세스(Forsberg, 1996) 등이 어종의 모집단에 대한 연구에 적용되었으며 대기행렬 이론(Halachmi, 2007),

† Corresponding author : 051-629-5723, ehyy@pknu.ac.kr
* 이 논문은 2012학년도 부경대학교 연구년 지원사업에 의해 연구되었음.

최적 통제(Hernandez et al., 2007)모형이 수온(Hernandez et al., 2007) 그리고 시장가격(Forsberg and Guttorman, 2006) 조건을 고려하는 경우에 적용되었다. 이러한 기존 연구의 대부분은 단일어종(Hernandez et al., 2007)을 대상으로 하나의 수조인 경우를 가정하여 연구하였으며 다수의 양식장을 대상으로 하는 경우는 새우 양식장에 대한 연구(Tian et al., 2000)가 대부분 이었다.[1)]

양식에 있어서 중요한 의사결정 문제중의 하나는 언제 입식하여 어떠한 방법으로 양식한 후에 언제 출하할 것인가를 결정하는 것이다. 본 연구에서는 어류 육상양식장에서 수조에 어느 정도 축양을 할 것인가? 수조에 축양하는 것이 한계에 이르렀을 때 몇 개의 수조로 나눌 것인가? 하는 문제에 대하여 생각하여 보고자 한다. 양식의 효율성은 양식장의 환경적 요인, 품종 및 사료효율과 관련된 생물적 요인, 양식장 운영방법에 따른 관리적 요인에 의하여 결정된다. 양식장의 운영방법에 따른 효율성에 대한 문제는 생물학적인 관점에서의 양식조건, 즉 양식공학적인 측면에서 대부분 이루어진다. 그러나 자원제약을 고려하는 경우 효율적인 수조의 할당과 수자원 이용문제는 양식장의 운영관리에서 중요한 경제적 의사결정 문제이다. 육상양식장의 경우에는 양식장의 시설에 대한 자본투자의 규모가 크고 시설 규모의 제약이 있기 때문에 경제적인 관점에서 이러한 문제는 더욱 중요한 문제가 된다. 이러한 측면에서 육상수조에 어떠한 방법으로 어류를 양식할 것인가 하는 문제 즉 생산 계획의 문제는 양식공학적인 문제와 경제적인 문제가 결합되어 있는 문제라고 할 수 있다.[2)]

육상양식장의 경우 수조에 어느 정도로 축양할 것인가 하는 문제에 대한 수학적 최적 모형에 대한 연구는 Halachmi et al(2005)가 순환여과식 양식장(RAS)에서 도미를 양식하는 문제에 대하여 연구한 바 있다. Seginer와 Halachmi(2008)은 양식공학과 경제적인 문제를 결합하여 다음과 같은 시스템 모형의 가정을 전제하고 연구하였다. 어류의 모집단은 같은 크기로 이루어져 있으며 매년 같은 크기로 하나의 양식장 수조에 투입하여 키우며 양식하는 동안 최대한으로 먹이가 제공되고 원하는 최종 크기로 양식된다. 물리적 경제적 환경은 일년 단위이며 수온과 시장에서의 가격과 판매는 사인곡선(sinusoidal) 형태로 표현이 가능하다. 이러한 가정의 전제에서 이들이 한 연구는 양식공학적인 문제를 경제적인 문제와 연결하였다는 점에서 의미가 있다. 그러나 이들의 연구는 단일 수조이용 가정과 현실성이 낮은 가격함수의 설정 때문에 현실성이 낮고 적용에서의 한계점이 존재한다. 육상에서 다수개의 수조를 이용하는 환경에서 양식하는 문제를 다룬 기존의 연구는 없다. 이는 문제의 복잡성이 너무 커 수학적 모형으로 문제를 해결하기가 어려웠기 때문이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 넙치양식장과 같은 다수개의 수조를 이용하는 경우 수조에 어떤 방식으로 어느 정도로 축양하고 어떻게 언제 분기할 것인가에 대한 문제 즉 생산 일정계획(production scheduling)에 대하여 연구하고자 한다. 이에 대한 문제는 수학적 모형화를 하기 어렵고 모형을 구축한 후 해를 구하기가 어렵기 때문에 연구가 이루어지지 않았다. 본 연구는 다음과 같은 측면에서 연구의 의의가 있다고 생각한다.

첫째, 다수개의 수조를 이용하는 경우에 어떤 방식으로 양식할 것인가 하는 연구는 Tien et al.(2000)이 해상 새우양식에 대하여 연구를 하였다. 이들은 양식 단계를 4단계로 구분하고 시뮬레이션 방법을 이용하여 해를 구하는 방법을 제시하였다. 본 연구는 다수개의 육상수조를 이용하는 경우에 수학적 최적모형을 이용하여 생산일정계획 문제 해결을 시도하였다는 데 그 의미가 있다.

둘째, 본 연구에서 가정한 양식장은 넙치 육상

1) 수산양식에서 수리계획모형의 연구는 Bjørndal, et al.(2004)의 연구가 잘 정리하고 있다. 이를 참조하기 바람

2) 이에 대한 논의는 Pascoe et al.(2002)을 참조

양식장이다. 넙치 육상 양식은 매우 기술이 발달하였으며 그 기술이 어느 정도 표준화 단계에 접어들고 있지만 넙치 양식장의 생산 계획에 대한 연구는 아직까지 이루어지지 않았다. 연구대상을 넙치의 육상양식장을 선택하였다는 점과 양식공학과 경제모형을 결합하여 문제해결을 시도하였다는 측면에서 의의가 있다.

셋째, 넙치의 육상 양식은 산업적으로 중요하다. 우리나라의 경우 육상 양식에서 가장 큰 비중을 차지하는 중요한 어종은 넙치이다.[3] 넙치의 육상양식장의 경우 효율적인 수자원과 토지의 이용이 양식 비용의 측면에서 중요한 문제이다. 그러므로 이러한 측면에서의 효율적 양식장 운영을 위한 연구는 중요한 문제라고 할 수 있다. 이러한 연구는 양식장 운영에 대한 이해력을 높일 뿐 아니라 양식장 운영에서 양식공학과 운영관리의 개념이 결합된 새로운 관점을 제시함으로써 향후 이러한 연구가 많이 시도될 수 있을 것으로 생각한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 수학적 모형에 적용하는 데 이용된 개념을 제시하고 그 이론적 근거에 대하여 살펴본 후 수학적 모형을 제시하였다. Ⅲ장에서는 그 모형의 해를 구하는 알고리즘을 제시하였다. 그리고 간단한 수치적 예를 제시하였다. Ⅳ장에서는 연구결과를 요약하면서 모형의 한계점과 앞으로의 연구에 대하여 언급하였다.

Ⅱ. 모형의 구축

1. 기본 모형

Von Bertalanffy 연구 이후 여러 가지 조건에서 어류성장을 측정할 수 있는 다양한 형태의 연구가 이루어져 왔다.[4] 기존 연구에서 어류 성장 표현식은 곱의 형태나 합의 형태로 대부분 표현되었으며 변수는 성장률(G), 현재상태의 크기(W), 양식장의 수온(T), 양식기간(t), 사료(Z) 등이 이용되었다. 이를 일반적인 함수 표현식으로 나타내면 다음과 같다.

$$G \equiv \frac{dW}{dt} = f(W, T, Z, t) \tag{1}$$

본 연구에서 수조이용에 관련된 문제에 접근하기 위하여 수온은 양식을 하면서 통제하지 않고 물을 공급하는 것으로만 하며 먹이는 성장에 필요한 만큼 즉 포만감을 가질 정도로 지속적으로 사료를 공급하는 것으로 가정한다. 이 경우 성장률은 시간과의 함수관계로 표현이 가능하며 양식 어류의 크기(무게)는 다음과 같은 시간의 함수 표현식으로 나타난다.

$$W = f(t) \tag{2}$$

이 함수의 특성은 함수 (1), (2)의 가정으로부터 단조증가함수이다. 즉 양식 어류의 무게는 시간이 증가함에 따라 감소하지 않는다.

양식수조에 있는 양식 어류의 총무게(Wp)는 양식 어류 개체수(n)와 개별 양식 어류의 크기와의 곱의 형태로 표현된다.

$$W_p = nW \tag{3}$$

수조에서 양식을 할 수 있는 최대한의 생체중량(biomass)은 양식하고 있는 수조를 분기하는 기준이 된다. 주어진 양식환경에서 효과적으로 양식이 가능한 생체무게총량의 한계를 임계양식총량(critical standing corp: CSC)이라고 하는 데, 생물학적으로 양식임계총량에 가깝게 양식할수록 성장률이 낮아지고 발병률이 높아지므로 분기하

3) 넙치 육상양식의 경우 2011년 기준으로 활어생산량은 72419M/T(판매액은 7710억원)에 이르며 이중 넙치는 40805M/T 생산에 판매액은 4613억을 차지하고 있어 양식어종중 생산량이나 금액으로 보아도 55%를 상회하는 가장 중요한 양식어종이라고 할 수 있다. 어류양식현황조사(http://fs.fips,go.kr)

4) http://www.fao.org/docrep/w5449e/w5449e05.htm에 성장률 측정에 대한 연구가 잘 정리되어 있음.

여야 한다.[5] 양식장의 분기 기준은 양식수조의 임계양식총량(W_{csc})이 되며 수조안의 총생체중량은 이 기준값보다 적어야 한다.

$$W_p = nW \leq W_{csc} \tag{4}$$

다수개의 수조를 이용하여 양식을 하는 경우 수조를 이용하는 정책에 따른 사료비의 변동이 없다. 왜냐하면 어류를 일정기간 양식하여 목표크기까지 키우는 것이기 때문에 즉, 사료양은 최종 생체총량에 비례하기 때문이다. 그러므로 수조이용방법에 따라 달라지는 비용은 분조에 따르는 비용과 수조이용기간에 따라 발생하는 수자원 이용비용이다. 수조의 개수가 p개라고 하면 i번째 수조의 수자원 이용비용(C_{p_i})은 i번째 수조(p_i)의 총 이용기간(t_{p_i})에 비례하여 발생하기 때문에 시간에 따른 비용이다. 그러므로 전체 수조의 총 이용비용($\sum_{i=1}^{p} C_{p_i}$) 은 수조 단위기간당 비용이 ρ라고 하면 총 수조 이용시간에 따른 비용 ($\sum_{i=1}^{p} \rho \cdot t_{p_i}$)으로 나타난다.

$$\sum_{i=1}^{p} C_{p_i} = \sum_{i=1}^{p} \rho \cdot t_{p_i} \tag{5}$$

수조 분조에 따른 비용은 분조후의 수조 개수에 비례하여 발생하는 비용이다. j번째 분조에서 k_j 개로 분조하였다고 하면 수조 한 개에 대한 1회 분조비용(S)인 경우 총분조비용(S_{total})은 다음과 같이 나타난다.

$$S_{total} = \sum_{j=1}^{i} s \cdot k_j \tag{6}$$

이상의 의사결정과 관련된 문제를 해결하기 위하여 계량적 모형을 구축한다면 수조분조와 수조이용에 대한 제약조건을 만족시키면서 수조분조비용과 수조이용비용의 합을 최소화하는 모형이 될 것이다. 그러나 이 문제는 시간에 따른 양식어류의 크기가 비선형 함수이고 분조하는 방법은 무한이므로 수학적으로 해를 구하기 어려운 비선형문제(NP hard)가 된다. 이 문제를 해결하기 위한 접근방법은 시간에 따른 성장함수를 선형관계식으로 바꾸거나 분조비용과 수조이용비용의 관계식을 도출하여 제약조건을 단순화 하는 방법밖에는 없다. 문제의 성격으로 보아 성장함수의 선형화는 불가능하므로 제약조건에 대한 관계식을 검토하여 수학적 모형을 구축하여 시도하고자 한다.

2. 모형의 구축

양식수조의 수는 p개이고 양식 수조의 크기는 같으며 1개 분조하는 데 발생하는 비용이 s, 그리고 수조에서 양성하는 기간은 χ인 문제를 가정하자. 양식을 시작하여 수조의 생체중량이 CSC에 도달하게 되면 분조를 하여야 하는 데 분조의 수에 따라 분조비용은 발생하고 분조하는 방법에 따라 수조유지비용은 변동이 발생하게 된다. 분조하는 방법은 크게 구분하면 균등하게 분조하는 방법과 불균등하게 분조하는 방법으로 생각할 수 있다. 불균등하게 분조하게 되면 분조된 수조마다 양식하는 어류의 수가 달라 CSC에 도달하는 시간 즉 수조이용기간이 차이가 나게 된다. 그러므로 분조된 수조 전체의 수조 이용시간이 변화하게 된다. 이러한 경우의 문제는 해결 불가

5) Brock(1992)와 LeaMaster(1992)는 고밀도 양식은 질병의 발병률을 높이고 적절한 양식밀도는 질병 발병률을 낮추므로 양식밀도가 질병발병률의 척도가 될 수 있다고 하였다. 일반적으로 양식장에서 양식어종의 무게총량(biomass)의 한계를 넘겨 양식을 하게 되면 발병률이 높아지고 성장률이 낮아지게 된다. Wang과 Leiman(2000)은 새우양식에서 밀식하지 않고 적절하게 양식밀도를 통제함으로서 양식재고통제와 질병처치, 양식사료낭비의 감소, 생존율 모니터링에서의 어려움의 감소, 양식장의 효율적 이용, 잠재적인 생산성의 증가 등이 발생한다고 주장하고 있다. 이러한 기존의 연구들을 정리하여 보면 양식밀도의 적정구간을 벗어나는 나는 경우 성장률과 생존률이 낮아지고, 어류의 성장률은 양식장의 임계양식총량에 가까워질수록 낮아진다는 것이다.

능한 비선형문제(NP hard)가 된다. 성장함수가 단조증가함수이고 오목한 경우에 분조한 수조 이용시간의 합은 같게 분조한 경우가 가장 적게 된다. 본 연구에서는 같은 규모로 분조를 하는 것을 전제하고 모형을 구축하고자 한다.

수조의 크기가 동일하고 분조를 할 때 같은 크기로 분조한다고 가정하고 이를 제약조건에 반영시킨다면 다음과 같다.

j=1 번째 즉 맨 처음 분조를 하는 경우 분조에서 $k_{j=1}$ 개로 분조하였다고 하면 분조비용은 $s \cdot k_{j=1}$가 되고 분조에 대한 제약조건은 한 개의 수조에서 분조하였으므로 1보다 크고 전체 수조의 수보다는 적어야 한다. 즉 다음과 같다.

$$k_{j=0} < k_{j=1} \le p \;\; k_{j=1} \in (2, p),\; k = \text{정수} \tag{7}$$

처음 수조에 입식 후 수조를 분조할 때까지 걸리는 시간(t_0)은 처음 수조에 입식한 치어(N_0)가 자라서 수조 생체임계총량(W_{csc})까지 자라는 시간이다. 그러므로 최초 분조까지 수조이용시간은 식(8)과 같다. 이때 첫 수조의 수조이용비용(C_0)은 양식기간(t_0) 동안 이용하게 되므로 시간당 1개 수조의 이용비용(ρ)에 양식기간을 곱한 값과 같다.

$$t_0 = f^{-1}(W_{\text{csc}}/N_0) \tag{8}$$

$$C_0 = \rho \cdot t_0 \tag{9}$$

식(8)과 식(9)의 값은 상수로 나타나며 초기 값의 성격을 가지고 있다.

수조를 j=2 분조할 때 까지 걸리는 시간(t_1)은 처음부터 수조에 입식한 치어($N_0/k_{j=1}$)가 자라서 수조 생체임계총량(W_{csc})까지 자라는 시간이다. 그러므로 분조까지 수조이용시간은 식(10)와 같다. 이때의 수조이용비용($C_{1,k_{j=1}}$)은 수조 $k_{j=1}$ 개가 양식기간($t_{1,k_{j=1}} - t_0$) 동안 이용하게 되므로 수조의 이용비용(ρ)에 양식기간을 곱한 값과 같다.

$$t_{1,k_{j=1}} = f^{-1}(k_{j=1} \cdot W_{\text{csc}}/N_0) \tag{10}$$

$$C_{1,k_{j=1}} = \rho \cdot (t_{1,k_{j=1}} - t_0) \cdot (k_{j=1}) \tag{11}$$

j=2 번째 즉 처음 분조 $k_{j=1}$에서 $k_{j=2}$ 개로 분조하였다고 하면 분조비용은 $s \cdot k_{j=2}$가 되고 분조에 대한 제약조건은 $k_{j=1}$의 수조에서 분조하였으므로 $k_{j=1}$ 보다 크고 전체 수조의 수보다는 적어야 한다.

$$k_{j=1} < k_{j=2} \le p \;\; k_{j=2} \in (k_{j=1}+1, p),$$
$$k = \text{정수} \tag{12}$$

수조를 j=3 분조할 때까지 걸리는 시간($t_{2,k_{j=2}}$)은 처음부터 수조에 입식한 치어($N_0/k_{j=2}$)가 자라서 수조 생체임계총량(W_{csc})까지 자라는 시간이다. 그러므로 분조까지 수조이용시간은 식(13)과 같다. 이때의 수조이용비용(C_2)은 수조 $k_{j=1}$개가 양식기간($t_{2,k_{j=2}} - t_{1,k_{j=1}}$) 동안 이용하게 되므로 수조의 이용비용($\rho$)에 양식기간을 곱한 값과 같다.

$$t_{2,k_{j=2}} = f^{-1}(k_{j=2} \cdot W_{\text{csc}}/N_0) \tag{13}$$

$$C_{2,k_{j=2}} = \rho \cdot (t_{2,k_{j=2}} - t_{1,k_{j=1}}) \cdot (k_{j=2}) \tag{14}$$

$j=\lambda$ 번째 즉 분조 $k_{j=\lambda-1}$에서 $k_{j=\lambda}$ 개로 분조하였다고 하면 분조비용은 $s \cdot k_{j=\lambda}$가 되고 분조에 대한 제약조건은 $k_{j=\lambda-1}$의 수조에서 분조 하였으므로 $k_{j=\lambda-1}$ 보다 크고 전체 수조의 수보다는 적어 한다.

$$k_{j=\lambda-1} < k_{j=\lambda} \le p \;\; k_{j=\lambda} \in (k_{j=\lambda-1}+1, p)$$
$$k = \text{정수} \tag{15}$$

수조를 $j=\lambda$+1 분조할 때까지 걸리는 시간($t_{\lambda,k_{j=\lambda}}$)은 수조에 입식한 치어($N_0/k_{j=\lambda}$)가 자라서 수조 생체임계총량($W_{\text{csc}}$)까지 자라는 시간

이다. 그러므로 분조까지 수조이용시간은 식(16)과 같다. 이때의 수조이용비용($C_{\lambda,k_{j=\lambda}}$)은 수조($k_{j=\lambda}$)가 양식기간($t_{\lambda,k_{j=\lambda}}-t_{\lambda-1,k_{j=\lambda-1}}$) 동안 이용하게 되는 비용으로 식(17)과 같다.

$$t_{\lambda,k_{j=\lambda}}=f^{-1}(k_{j=\lambda}\cdot W_{\mathrm{csc}}/N_0) \qquad (16)$$

$$C_{\lambda,k_{j=\lambda}}=\rho\cdot(t_{\lambda,k_{j=\lambda}}-t_{\lambda-1,k_{j=\lambda-1}})\cdot(k_{j=\lambda}) \qquad (17)$$

분조에 대한 조건식인 식(17)을 보면 $k_{j=\lambda}=p$ 인 경우에 즉 분조 후 수조 전체에 분조가 되면 더 이상 분조를 할 필요가 없게 된다. 그러므로 이러한 조건은 제약조건으로 나타나야 된다.

이상을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Min\,z=\sum_{\lambda=0}^{\lambda^0}(C_{\lambda,k_{j=\lambda}}+s\cdot k_{j=\lambda})$$

subject to

$$C_{\lambda,k_{j=\lambda}}=\rho\cdot(t_{\lambda,k_{j=\lambda}}-t_{\lambda-1,k_{j=\lambda-1}})\cdot(k_{j=\lambda}),$$

$$\lambda\in(1,\lambda^0)$$

$$t_{\lambda,k_{j=\lambda}}=f^{-1}(k_{j=\lambda}\cdot W_{\mathrm{csc}}/N_0) \qquad \lambda\in(1,\lambda^0)$$

$$k_{j=\lambda-1}<k_{j=\lambda}\le p \quad k_{j=\lambda}\in I(1,p),$$

$$\lambda\in I(1,\lambda^0)$$

$$k_{j=\lambda}\ni_1 I(2,p)\ \mathrm{for}\ \lambda=1,2,\ldots,\lambda^0$$

$$k_{j=\lambda^0}=p$$

$$k_{j=0}=1$$

$$t_0=f^{-1}(W_{\mathrm{csc}}/N_0)$$

$$C_0=\rho\cdot t_0$$

$$W_{esc},\rho,p=constant$$

$$\lambda,\ k=decision\,variable$$

Ⅲ. 모형의 해법과 적용

1. 모형의 해법

분조에 대한 수학적 모형을 보면 제약조건식에 비선형 제약조건을 가지고 있으며 변수가 정수이다. 이 문제는 제약조건식에 비선형조건식이 포함되어 있고 정수의 제약조건으로 인하여 미적분을 이용하는 해법을 이용할 수 없음으로 효과적으로 해를 찾기 어려워 열거법(enumeration method)이나 가지치기 계산절차(branch and bound algorithm)를 적용하여 해를 구하여야 한다. 이 경우 문제의 성격에 맞는 발견적 법칙을 찾을 수 있다면 계산량을 줄이면서 최적해를 찾을 수 있다. 수조의 개수가 p이고 개당 분조비용이 s이고 수조 $(k_{j=\lambda}-k_{j=\lambda-1})$개가 양식기간($t_l-t_\lambda$) 동안 이용하게 되는 비용이므로 수조 이용비용은 첫 번째 분조를 할 때 p-1개의 수조에 분조를 하게 되면 분조비용은 $s\cdot p$ 로 가장 작게 발생하고 수조 이용비용은 $\rho\cdot(t_l+(p-1)(t_l-t_1))$ 가장 크게 발생한다. 분조비용이 가장 크게 발생하는 경우는 분조할 때마다 하나씩 증가하는 경우이며 이때의 분조비용은 2에서 p까지의 합에 대한 비용 $s\cdot(p(p+1)/2-1)$으로 나타난다.

이 경우 수조이용비용은 분조하는 수에 따른 수조이용시간을 계산하므로 간단하게 계산하기 어렵다. 수조이용비용과 분조비용은 서로 역의 관계에 있으므로 수조번호가 적은 번호로부터 변동에 따른 비용이 큰 항목을 기준으로 하여 작은 항목의 비용을 비교 즉 가지치기 하는 것이 계산량이 줄어 효과적이다. 이러한 발견적 법칙과 가지치기 계산절차(branch and bound algorithm)를 적절하게 결합한다면 다음과 같은 계산절차를 생각하여 볼 수 있다.

단계 1 : 첫 수조(water tank no. 1: wp1)의 성장함수를 이용하여 초기 값과 임계생체중량에 도달할 때까지 총비용을 구한다. 수조번호를 가지치기 가능집합(branch set P)에 포함시킨다.

단계 2 : 가지치기 가능집합(P)의 wp no.에 1을 더하여 가지치기 가능 집합에서 가능한 경로들을 그 수조에 이르는 평가집합(evaluation set E)에 포

함시키고 총비용을 계산한다.

단계 3 : 평가집합(E)을 비교하여 wp no.에 가장 적은 값인 경우 가능집합에 포함시키고 다음의 경우에는 가능집합(P)에서 제외시킨다.

원칙 1 : 비교 수조 wp k에서 평가집합이 결정된 후 경로에 같은 가지치기 가능수조에서 가지치기하여 평가가 되고 평가 값 중 하나가 가지치기 가능집합으로 되는 경우, 앞 단계 가지치기가 된 수조번호는 가지치기 가능 집합(P)에서 제외시킨다.

원칙 2 : 수조 가능집합에서 제외되는 수조번호보다 적은 수조가능 수조번호가 있고 번호가 커질수록 비용이 증가하는 경우 가지치기 가능집합에서 제외시킨다.

단계 4 : 수조번호가 p값보다 작으면 단계 2에 돌아간다. 수조 번호가 p값이면 평가집합에서 최적 해를 찾는다.

2. 모형의 수치적 예

성장함수가 단조증가함수이어야 한다는 조건은 양식기간에 범위에만 만족하면 되므로 다음의 성장함수 경우를 예로 들어 계산절차를 적용하여 보고자 한다.6)

성장함수

$$y = -6.4278 + 1.1576x - 0.00077x^2 + 0.000018x^3$$

x= 양식일 수(day)

y= 생체무게(g)

수조의 수(p) : 15

수조이용비용 : a/day

수조분조비용 : 10a/pool

치어 수 : 10000마리

임계 생체중량 : 5ton/pool

계산절차를 적용하기 위해 성장함수를 이용하여 초기값을 구한다. x=10에서 보면 생체무게가 5.0442g으로 이 때를 양식 시작일로 한다. 양식일 x=48에서 y=49.30858 이므로 분조를 하여야 한다.

가지치기 가능 집합 P(wp1)에 포함시킨다. 수조번호에 1을 더하면 wp2가 되고 이 수조도 가지치기 가능수조에 속하게 되므로 가지치기 가능집합은 P(wp1, wp1-2)가 된다. 이 집합은 가지치기 가능집합인 동시에 평가집합이 되며 탈락할 수조는 존재하지 않는다. 다시 한 개의 값을 더하면 수조번호는 wp3이 되고 wp3에 이르는 방법은 w1-3과 w2-3 두 가지의 경우가 발생하므로 평가집합 E(wp1-3, wp1-2-3)을 구성한다. wp1-3=288a 이고 wp1-2-3=270a 이므로 분조가능집합에 포함되는 것은 wp3=wp1-2-3가 된다. 따라서 원칙1에 따라서 w1은 가지치기 가능 집합에서 제외되므로 가지치기 가능집합은 P(wp1-2-3, wp1-2)가 된다. 다시 단계2로 돌아가면 wp4가 된다. wp4에 이르는 방법은 wp1-2-3-4와 wp1-2-4 두 가지의 경우가 발생하므로 평가집합 E(wp1-2-3-4, wp1-2-4)을 구성한다.

wp1-2-3-4=444a이고 wp1-2-4=416a 이므로 분조가능집합에 포함되는 것은 wp4=w1-2-4가 된다. 가지치기 가능 집합에서 제외되는 것이 발생하지 않음으로 가지치기 가능집합은 P(wp1-2, wp1-2-3, wp1-2-4)가 된다. 이러한 절차에 따라서 p=15까지 계산한 결과는 다음과 같다.

<Table 1>에서 연산과정을 보면 수조번호가 증가할수록 평가집합의 수가 커지므로 계산량이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 문제의 규모 즉, 수조의 수(p)가 커지면 컴퓨터 계산 알고리즘이 필요할 것으로 생각되나 수조의 수가 한정적인 현실문제에서는 이용하기에 어려움이 없을 것으로 생각된다. <Table 2>는 분조비용이 5a, 10a, 15a인 경우 최적해를 구한 결과이다.

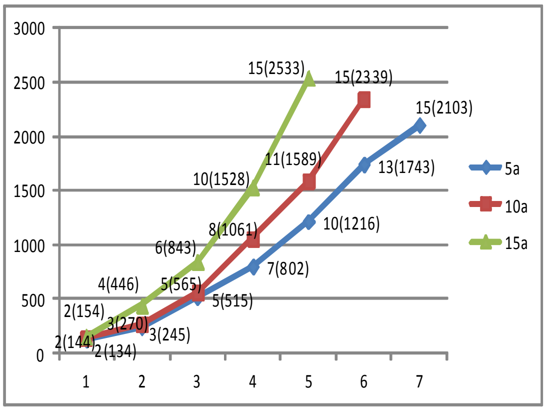
6) Eh Y. Y.(2011)의 연구에서 발췌한 함수임.

<Table 1> Application of Algorithm

water tank no.	evaluation set E	branch possible set P	remark
1	wp1	wp1	
2	wp12(144a)	wp1,wp12	
3	wp13(288a), wp123(270a)	(wp1), wp12, wp123	wp1 out, p.1
4	wp24(416a), wp34(444a)	wp12, wp123, wp124	
5	wp125(599a), wp1235(565a), wp1245(581a)	(wp12), wp123, wp124, wp1235	wp2 out, p.1
6	wp1236(738a), wp1246(728a), wp12356(738a)	wp123, wp124, wp1235, wp1246	
7	wp1237(935a), wp1247(899a), wp12357(887a), wp12467(917a)	(wp123), wp124, wp1235, wp1246, wp12357	wp3 out, p.1
8	wp1248(1096a), wp12358(1061a), wp12468(1072a), wp123578(1095a)	wp124, wp1235, wp1246, wp12357, wp12358	
9	wp1249(1307a), wp12359(1249a), wp12469(1241a), wp123579(1247a), wp123589(1424a)	wp1235, wp1246, wp12357, wp12358, wp12469	
10	wp123510(1445a), wp124610(1418a), wp1235710(1407a), wp1235810(1431a), wp1246910(1471a)	(wp1235), wp1246, wp12357, wp12358, wp12469,wp1235710	wp5 out, p.1
11	wp124611(1629a), wp1235711(1591a), wp1235811(1589a), wp1246911(1615a),wp123571011(1648a)	wp1246, wp12357, wp12358, wp12469,wp1235710, wp1235811	
12	wp124612(1844a), wp1235712(1799a), wp1235812(1781a), wp1246912(1793)a,wp123571012(1813a), wp123581112(1853a)	wp1246, wp12357, wp12358, wp12469,wp1235710, wp1235811, wp1235812	
13	wp124613(2041a), wp1235713(2005a), wp1235813(1961a), wp1246913(1959a),wp123571013(1943a), wp123581113(1995A), wp1235812(2041a)	wp1246, wp12357, wp12358, wp12469,wp1235710, wp1235811,wp1235812, wp123571013	
14	wp124614(2310a), wp1235714(2231a), wp1235814(2181a), wp1246914(2165a), wp123571014(2159a), wp123581114(2177a), wp123581214(2201a), wp12357101314(2223a)	wp1246, wp12357, wp12358, wp12469, wp1235710, wp1235811, wp1235812, wp123571013, wp123571014	
15	wp124615(2558a), wp1235715(2462a), wp12358(2396a), wp1246915(2366a), wp123571015(2347a), wp123581115(2339a), wp1235812(2366a), wp12357101315(2378a), wp123571014(2444a)		optimal solution

<Table 2> Optimal Solution According to Water Tank Division Cost

division cost	5a	10a	15a
1	wp1	wp1	wp1
2	wp12(134a)	wp12(144a)	wp12(154a)
3	wp123(245a)	wp123(270a)	wp123(295a)
4	wp24(386a)	wp24(416a)	wp24(446a),
5	wp1235(515a)	wp1235(565a)	wp1235(615a)
6	wp1246(673a)	wp1246(728a)	wp1246(843a)
7	wp12357(802a)	wp12357(887a)	wp1247(964a)
8	wp123578(970a)	wp12358(1061a)	wp12358(1151a)
9	wp123579(1117a)	wp12469(1241a)	wp12359(1344a)
10	wp1246910(1216a)	wp1235710(1407a)	wp124610(1528a)
11	wp1235811(1444a)	wp1235811(1589a)	wp1235711(1731a)
12	wp1246912(1528a)	wp1235812(1781a)	wp1235712(1944a)
13	wp123571013(1743a)	wp123571013(1943a)	wp1235813(2116a)
14	wp123571014(1949a)	wp123571014(2159a)	wp12461014(2340a)
15	wp12357101315(2103a), wp123581115(2119a)	wp123581115(2339a), wp123581245(2366a),	wp123581115(2559a), wp12461015(2533a)



[Fig. 1] Water Tank Cost According to Type of Water Tank Division Cost

<Table 2>와 [Fig. 1]에서 보면 분조비용이 증가할수록 예측한 바와 같이 분조횟수는 줄어들고 총비용은 증가함을 볼 수 있다. 즉 분조비용이 5a인 경우는 7번의 분조를 하고 10a인 경우는 6번의 분조를 하며 15a인 경우는 5번의 분조를 하며 총비용은 236a, 194a 증가한다.

분조비용이 2배와 3배로 증가함에도 수조의 분조비용 증가분은 <Table 3>에서 보는 바와 같이 감소하고 총비용의 증가분은 작아지고 있음을 살펴볼 수 있다.

<Table 3> Cost According to Water Pool Division Cost

type of division cost	total division cost	total water tank cost	total cost
5a	275a	1828a	2103a
10a	440a	1789a	2339a
15a	555a	1978a	2533a

Ⅳ. 결론 및 연구한계

본 연구는 양식어업 중 육상수조식 양식장의 분조문제를 대상으로 하였다. 수조 분조를 다루는 대표적인 방법이 분조를 가정하고 그 비용을 분석하는 시뮬레이션 접근을 하는 반면에 본 연

구에서는 양식장 분조에서의 이용기간에 대한 비선형변수를 직접해결하지 않고 분조횟수와 분조수를 의사결정변수로 하는 모형을 개발하고 해법을 제시하였다. 본 연구에서는 넙치 육상양식장을 사례로 해법을 적용하여 해를 구하고 해법의 성격을 살펴보았다. 이 문제는 본질적으로 할당문제의 일종이라고 할 수 있는 데 제약조건에 비선형함수가 포함된 유형의 할당문제는 연구가 이루어지지 않았다.

본 연구의 주요 연구 결과와 기여점은 다음과 같다.

첫째, 기존 연구에서는 육상양식장의 단일 수조에 대하여 성장모형이 연구된 데 반해, 본 연구에서는 성장함수를 적용하는 육상양식장의 수조 분조에 대한 새로운 모형을 제시했다. 특히 수조분조와 어류성장모형을 함께 고려하였는데 기존의 문헌에서는 이러한 주제가 다루어지지 않았다는 점에서 연구기여도를 찾을 수 있다.

둘째, 모형의 해를 구하기 위하여 분지가능집합과 평가집합을 구성하고 가지치기탐색법에 기반을 둔 최적화 알고리즘을 개발하였다. 즉, 성장함수의 단조 관계(monotonicity)를 이용하여 효과적인 휴리스틱을 개발하고 비선형 문제의 가지치기탐색법을 개발하였다는 점에서 연구의 의의가 있다.

셋째, 임의적인 사례 문제를 설정하고 문제를 실험 연산 하였다. 제시된 문제에 대하여 알고리즘을 적용하여 해를 구함으로서 연산가능한 수준의 해법임을 보였으며 대상 문제에 제시된 해법이 충분히 적용될 수 있다는 것을 보임으로서 계산절차의 유용성을 보였다는 데 의의가 있다.

그러나 본 연구는 대상문제에 처음 접근함으로 인하여 연구의 한계가 있었으며 이에 따른 향후 연구과제는 다음과 같다.

첫째, 분지선택(branching)과 바운딩(bounding)의 개선 즉 분지가능집합과 평가집합을 구성하는 방법의 개선이 필요하다. 분지는 $x_{ij} = 0 \text{ or } 1$ 이 가장 기본적인 것이다. 알고리즘에서 수조의 수가 증가하면서 평가집합의 수가 커지므로 그 결과 계산량이 이에 비례하여 증가하게 된다. 평가집합에서 선택 불가능한 수조를 효과적으로 탈락시키는 기법의 개발이 요구된다.

둘째, 모형의 유용성을 높이기 위해서는 모형 적용에 필요한 적절한 성장함수, 분조비용, 수조 이용비용의 측정이 무엇보다도 중요하다. 향후 이러한 함수와 상수에 대한 측정방법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 모형의 적용을 위해서는 개별 양식장에 대한 적용이 쉬워야 하므로 간편한 적용 방법의 개발도 필요할 것으로 생각된다.

Reference

Bjørndal, T.・Lane, D. E. & Weintraub, A.(2004). Operational research models and the management fo fisheries and aquaculture: a review, European Journal of Operational Research, 156, 533～540.

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.

Cacho, O. J.(1997). System modelling and bioeconomic modelling in aquaculture, Aquaculture Economic and Management, 1, 45～64.

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 Effect on Productivity of Flounder Culture Farms," The Journal of Fisheries Business Administration, 44(3), 79～94.

FAO(http://www.fao.org/docrep/w5449e/w5449e05.htm)

FIPS(http://www.fips.go.kr)

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.

Forsberg, O. I. & Guttormsen, A. G.(2006). The value of information in salmon farming. Harvesting the right fish at the right time, Aquaculture Economic and Management, 10, 183～200.

Fulks, W. & Main, K. L.(Eds)(1992). Diseases of cultured Penaeid Shrimp In Asia and the United States. The Oceanic Institute, HI, 209～232.

Halachmi, I.(2007). Biomass management in recirculating aquaculture systems using queuing network, Aquaculture, 262, 514～520.

Halachmi l.・Simon Y.・Guetta R. & Hallermand, E. M.(2005). "A novel computer simulation model for design and management of re-circulating aquaculture systems," Aquacultural Engineering, 32, 443～464.

Hernandez, J. M.・Gasca-Leyva E.・Leon, C. J. & Vegara, J. M.(2003). A growth model for gilthead sea bream(Sparus aurata), Ecological Modelling, 165, 265～283.

Hernandez, J. M. & eon-Santana, M. & Leon, C. J. (2007). The role of the water temperature in the optimal management of marine aquaculture, European Journal of Operational Research, 181, 872～886.

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.

National Fishries Research & Development Institute (NFRDI) (2006), Standard Manual Olive Flounder Culture.

Pascoe, S.・Wattage, P. & Naik, D.(2002). Optimal harvesting strategies: practice versus theory, Aquaculture Economic and Management, 6, 195～208.

Schnute, J. T. & 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. & Halamachi I.(2008), "Optimal Stocking in intensive aquaculture under sinusoidal temperature, price, and marketing condition," Aquacultural Engineering, 39, 103～112.

Seginer, I.・Mozes, N. & Lahav, O.(2008), A design study on the optimal water refreshment rate in recirculating aquaculture systems, Aquacultural Engineering, 38, 171～180.

Tian, X.・Leung, P. S. & Lee, D. J.(2000), Size economics and optimal scheduling in shrimp production: result from a computer simulation model, Aquacultural Engineering, 22, 289～307.

Wang, J-K & Leiman, J.(2000). Optimizing multi-stage shrimp production systems, Aquacultural Engineering, 22, 243～254.

Yi, Y.(2000). A bioenergetics growth model for Nile Tilapia (Oreocromis niloticus) based on limiting nutrients and fish standing crop in fertilized ponds, Aquacultural Engineering, 18, 157～173.

● 논문접수일 : 2014년 03월 05일
● 심사완료일 : 1차 - 2014년 04월 14일
● 게재확정일 : 2014년 04월 21일