

동적 균형상태를 중심으로 본 금강 지천의 참게자원 분석

Applying Steady State Analysis to the Study of Mitten Crabs in Jichun, Kum River

전대욱 * · 정희성**

Jeon, Dae-Uk* · Jeong, Hoi-Seong**

Abstract

This article deals with an ecological-economic analysis of the 'Pasture Project of Kum River', which is the farming plan of mitten crabs using Jichun, a stream of the River Kum where the natural propagation of mitten crabs are blocked because of the estuary dam constructed in 1990. Toward analyzing the ecological and economic effects of the crab releasing and harvesting activities in Jichun, a two-stage cohort model of population dynamics with cannibalistic behaviors and density restrictions in biomathematics is adopted, despite of the current infertility in Kum, considering the opportunity of establishing dam fishways in the near future. This study moreover presents a method of parameter estimation especially with assuming a steady state of the ecosystem, and performs various analyses such as the risk measurement of climate change and the economic value of such fishways.

KeyWords : 참게, 목장화 사업, 개체군 동학, 동적 균형상태, 계수추정, 생물자원의 경제성 평가

(river crabs or mitten crabs, pasture project, population dynamics, steady state, parameter estimation, economic evaluation of biomass)

* 한국지방행정연구원 수석연구원 (1저자, dujeon@krila.re.kr)

** (사)환경과문명 대표 · 이사장 (공동저자, hoiseong54@gmail.com)

I. 참게의 생태적 특징과 목장화 사업

1. 참게의 생태적 특징

민물 갑각류로서 참게는 임진강, 한강, 금강 등 우리나라의 주요 하천에서 서식하며 하천의 수온이 내려가기 시작하는 8월부터 11월까지 번식기를 맞아 해수역으로 이동하는 회유종으로서 민물과 바닷물이 교차하는 기수지역에서 포란과 교미를 한다. 성숙한 암게 1마리가 대략 40~50만 개의 알을 포란하는데, 이듬해 부화한 유생은 다시 강 상류 쪽으로 거슬러 올라오면서 탈피를 거듭하며 성장한다. 참게는 생존력이 가장 취약한 이 탈피단계에서 공식(cannibalism) 등으로 대부분 희생되는데 이러한 공식행태는 수온과 먹이의 변화 등 서식환경이 불안정할 경우 더 많이 일어난다고 알려져 있다. 이러한 과정을 거쳐 성장하는 치게는 대략 2년 혹은 그 이상의 기간 동안 성장하여 성게가 된다. 성게는 생식기가 성숙하면 월동을 하지 못하고 하류로 이동하여 번식행위를 하고 전부 폐사하며, 번식 불가능한 성게는 서식지인 민물에서 월동을 한다. 금강 지천에서 이 비율은 20%로 알려져 있다(신현옥·김현우, 2007).

그러나 지난 1990년 금강 하구언의 건설과 농약의 확대는 이와 같은 참게의 서식환경을 처참하게 파괴하였고 그 결과로 금강에서 참게는 실질적으로 멸종되고 말았다. 임진강 역시 1990년대의 폐수 유출사건 등의 원인으로 참게를 찾아볼 수 없게 되고, 시장에서는 국내산 민물참게의 가격이 마리당 2만 원 이상을 호가(마리당 100g 기준)하게 되었다. 이후 오염 등에 생존력이 갖추어진 치게 단계까지 40~60일간 인공사육조에서 육성하여 방류하는 기술이 개발되었고, 1996년 최초로 임진강과 금강에 참게의 방류를 통한 생태복원과 수확활동이 재개되었다. 하구둑이 존재하지 않아 자연번식이 가능한 임진강은 참게어종의 생태복원이 가능하였으나, 하구둑으로 인해 생태복원이 불가능한 금강에서는 2006년 방류를 중단하면서 더 이상 자연상태에서 참게의 어획은 불가능하게 되었다.

2. 참게 목장화 사업

1996년에 처음으로 참게가 방류될 당시 민간업자¹⁾에 의해 도입된 이 기술은 경제성이 높은 획기적인 기술이었다. 치게 1마리당 300원 정도의 가격으로 방류가 가능하였고, 방류 2년 후 성게의 포획가능량이 방류량의 대략 28%²⁾을 감안하면 성게 1마리를 수확하는

1) 이 업체는 충청수산(충청남도 청양군 소재, Tel. 041-943-0008)이며, 본 논문의 저자들은 충청수산의 명노환, 유병화 사장님께 본 연구의 진행과 자료협조에 대한 깊은 감사를 드린다.

데 대략 1,000원의 비용이 들며, 이는 당시 성게 마리당 시장가격의 1/10에도 미치지 못하는 수준이었다. 이후 임진강과 금강, 한강에서의 참게 어획량이 증가하면서 국내 유통량 2,000톤 중에 국내산이 차지하는 비율이 대략 25%까지 증가하였으며, 참게의 가격도 최근에는 마리당 2천 원대(마리당 100g 기준)로 하락하게 되었다.

이후 참게, 황복 등 수산자원의 방류가 내수면 양식어업의 화두로 떠오르면서 2000년대 들어서 자치단체를 중심으로 활발하게 방류활동이 전개되었고, 이러한 활동들은 수산양식 기술을 활용하여 내수면이나 인근 해수면에 경제성이 높은 어종을 방류하여 대량생산을 꾀하는 ‘목장화 사업’으로 불리어지기 시작하였다. 참게는 성게단계에서는 3급수에서도 생존이 가능한 잡식성으로서, 논이나 하천 등 습지에서 수초와 각종 유기물을 섭생하므로 참게를 이용한 유기농법의 개발과 함께 새로운 농가소득원으로 각광받게 되었고, 아울러 방류활동과 지역축제 등의 문화관광 자원으로서도 주목받게 되면서 현재 금강을 중심으로 참게 방류를 통한 목장화 사업의 논의가 재개되고 있다.

금강에서 현재 고려되고 있는 목장화 사업은 401km에 달하는 금강수계의 작은 지류인 36km의 지천(충남 청양군 및 부여군 일대)을 대상으로 하는 안을 중심으로 논의되고 있으며, 금강수계 전체로까지 확장된 계획이 제안되고 있다. 금강 지천을 중심으로 하는 구체적인 안은, 금강 지천의 서식환경을 고려할 때 논을 포함하여 최대 770.6천 마리(77.1톤) 수확 가능하므로, 2,753천 마리의 치계를 매년 방류하여 최초 방류 2년 후부터 수확을 한다는 것을 제시하고 있다. 이에 관한 생태적 타당성 조사인 부경대 수산과학연구소의 신현욱·김현우(2007)의 연구에 따르면, 충청수산의 자료를 인용하여 금강 수계 전체로 확대하는 경우 대략 위의 지천 규모의 15배 정도로 방류 및 수확이 가능하다는 것을 명시하고 있다.

II. 본 연구의 목적과 이론적 모델

1. 본 연구의 목적과 선행연구와의 차별성

본 논문은 이상과 같은 금강 지천의 참게 목장화 사업을 대상으로 이에 대한 시스템적 접근과 시뮬레이션을 통한 생태경제적 효과의 측정을 그 목적으로 한다. 금강의 생태계는 현재 재생이 불가능하여 단순한 방류 및 수확의 비용과 편익을 정태적으로 계산하는 기존의 연구(신현욱·김현우, 2007)만으로도 충분할 수 있으나, 본질적인 참게 생태계의 깊이

2) 이는 금강, 특히 그 중류 부근의 지천을 중심으로 한 수치이며, 임진강의 경우 임진강 참게 어촌계에 따르면 대략 20%로 알려져 있다.

있는 이해와 복원가능성은 물론 추후 금강 하구둑의 어로개설 혹은 기후변화에 따른 서식 환경의 변화 등에 따른 사업의 파급효과 측정을 위해 이에 대한 동역학 시스템 모델이 필요하다고 판단하였다. 따라서 본 논문은 정회성·전대욱(2005, 2006) 등의 연구에서 다루었던 임진강의 참개 생태계의 모델을 환경이 제한적인 금강 생태계에 적용시키는 논의를 통해 금강 생태계를 위한 분석틀로 확장하고자 한다.

전술한 두 편의 연작논문과 차별적인 본 논문의 주요 공헌점이라고 할 수 있는 것은 첫째, 이와 같은 동역학 모델의 도입을 통해 기존의 연구에서는 시도하지 않았던 참개 목장화 사업이 갖는 다양한 효과들을 측정할 수 있었다는 것이며, 둘째 비록 금강의 참개 서식 환경이 현재 열악하나 동역학 모델이 갖는 동적 균형상태(steady-state)에 기반을 둔 이론 및 실제적 접근을 통해 추후 보다 친생태적인 환경으로의 변화로 이끄는 정책적 준비를 가능하게 한다는 점이다. 특히 이러한 동적 균형에 기초한 접근은, 동역학 관련 수학적 접근이 희소한 한국 시스템 다이내믹스 관련 학계에 공헌하는 바가 있을 것으로 기대된다.

이상과 같은 연구의 목적과 의의에 따라, 본 논문에서는 1장의 참개 생태계와 목장화 사업의 설명에 이어 2장에서 선행연구에서 다루던 생태적 동역학 시스템을 리뷰하고 본 연구의 동역학 모델을 도출한다. 3장에서는 동적 안정상태의 조건과 이를 활용하여 실험분석을 위한 파라미터의 추정을 다룬다. 아울러 4장에서는 금강 지천의 참개 목장화 사업에 대한 다양한 분석을 통해 생태경제적 파급효과를 측정하고 마지막으로 5장의 결론을 통해 연구 결과의 시사점과 의의 등을 제시한다.

2. 생태적 이론모델

임진강의 참개 생태계에 관한 두 편의 전작 논문(정회성·전대욱, 2005, 2006)에서 다룬 임진강의 참개 생태경제 통합체계에 관한 이론모델의 원형은 전형적인 생태학적 개체수 성장모델에 가격 파라미터와 경제적 의사결정 구조를 첨가한 Schaefer(1954, 1957)에 근거한다. 전형적인 개체수 성장모형은 특정 생태자원(생물종)의 개체수를 P 라고 할 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{P} = r \cdot P \cdot \left(1 - \frac{P}{K}\right) - c \cdot P = rP - kP^2 - cP \quad (\text{단 } k=r/K) \quad \dots\dots\dots 1)$$

여기서, 파라미터 r 과 c 는 각각 로지스틱 성장률과 수확률을, K 는 최대허용개체수(carrying capacity)를 나타낸다. 이러한 개체수 제약은 위 식의 괄호 안을 풀었을 때 나타나는 2차항으로 표현되며 이를 간단히 밀도제약식으로, 계수 $k (=r/K)$ 를 밀도제약 계수로 나

타내기도 한다.

그러나 식 1)과 같은 교과서적이며 단순화된 모형으로 참게 목장화 사업을 표현하기에는 무리가 있다. 참게 목장화 사업을 표현하기 위해서는 첫째, 수확과 방류가 각각 다른 연령 단계에서 발생하므로 이 두 활동을 표현하기 위해서는 최소 2단계의 연령구조를 가진 코호트 모형(cohort model)로 표현해야 한다. 둘째, 공식의 효과를 모델링해야 한다. 선행연구(정희성·전대욱, 2006)의 공식에 관한 시스템적 사고와 실험결과로부터, 성게 혹은 큰 치게가 어린 치게를 잡아먹는다는 것은 제한된 환경에서 종 전체의 생존을 위한 영양분의 효율적인 축적을 의미하며 이는 곧 공식행태 자체가 변형된 형태의 개체수 밀도제약을 의미한다는 사실을 밝힌 바 있다.

따라서 선행연구에서는 임진강의 참게 생태계를 다루기 위해 ① 밀도 제약이 포함된 2단계 연령구조의 코호트 모델, ② 공식행태에 관한 모델 등의 선행연구를 중심으로 모델을 재구성한 바 있다. Zaghrou & Attalah (1996) 및 Murray (1989) 등으로부터 발전된 2단계 연령구조 모델은 Jing & Ke (2004)에 의해 밀도제약이 포함된, 일반화된 2단계 코호트 모델(cohort model)로 제시되었다. 선행연구는 이 모델을 기본 구조로 하여, 공식(cannibalism)과 공식의 반대급부로 볼 수 있는 각 연령단계별 상보효과(recruitment relationship between mature and immature)를 모델링한 Armstrong & Sumaila (2000)의 공식행태에 관한 항을 추가한 새로운 모델을 제시하였다. 이러한 정희성·전대욱(2006)의 임진강 참게 생태계 모델에서 중복되는 의미의 치게 밀도제약식을 공식률(cannibalistic interaction parameter) e 로 대체한 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 &= b_1 \cdot P_2 - e \cdot P_1 \cdot P_2 - d_1 \cdot P_1 + \alpha \cdot c \cdot P_2 \\ \dot{P}_2 &= b_2 \cdot P_1 - k_2 \cdot P_2^2 - d_2 \cdot P_2 - c \cdot P_2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 2)$$

여기서 P_1 및 P_2 는 각각 어린 치게 및 성숙한 성게의 개체수를 의미하는 내생변수(stock variable)이며, 나머지 소문자로 표현된 것들은 모두 외생변수(parameter)이다. 구체적으로, b_i ($i= 1, 2$)는 각 단계의 출생률을, k_i 는 밀도제약 파라미터를, d_i 는 각 단계의 소멸률을, e 는 위에서 언급한 바와 같이 공식률, c 는 수확률, a 는 수확량 $c \cdot P_2$ 를 기준으로 한 방류율을 의미한다.

방류활동의 경우 실제적으로는 자치단체의 계획된 방류량에 기반하므로 수확량에 무관하게 상수로 설정할 수도 있을 것이다. 그러나 단기적으로 방류량은 예상수확량에 근거하며, 장기적인 관점에서는 수확량과 관련된 의사결정에 근거한다고 볼 수 있다. 따라서 이론적인 모델에서는 수확률에 비례한 방류율을 설정하는 것도 가능하며, 이 경우 방류활동은

‘음의 수확률’로 해석(정희성 · 전대욱, 2005)될 수 있으므로 하천의 서식환경 파괴와 같은 최근의 상황에서 자원경제학적 개념인 지속가능 최대생산량(MSY: Maximum Sustainable Yield)나 최근 제기된 지속가능 최적생산량(OSY: Optimum Sustainable Yield) 등에 관련된 추가적인 논의도 가능하다.

3. 본 연구를 위한 참계 목장화 사업의 이론 모델

식 1)의 개체수 성장모형을 제약식으로 삽입하여 만들어진 전통적인 생물경제학의 수확이윤 극대화 모형은 다음과 같다.

$$\max_c \int_0^{\infty} e^{-\delta t} [v - u(P)] \cdot c \cdot P \cdot dt \quad \text{s.t} \quad \dot{P} = r \cdot P - k \cdot P^2 - c \cdot P \quad \dots\dots\dots 3)$$

여기서, δ 는 시간에 따른 가치할인율을, v 는 가격 파라미터를, u 는 수확과 관련된 비용함수를 의미한다. 이러한 전통적인 모형에 기반하여 본 연구에서도 식 2)의 2단계 개체수 모형을 제약식으로 삽입하여 식 4)와 같이 금강 참계 목장화 사업을 대상으로 수확이윤의 동태적 극대화 모델링을 할 수 있다. 식 3)과 마찬가지로 시간에 따른 가치할인율을 δ 로, 수확한 성숙 참계의 가격을 V 로 놓고, 수확관련 비용함수 u 는 본 연구에서는 수확과 방류라는 두 가지 활동에 따라 각각에 소요되는 방류비용을 u_1 으로, 수확비용을 u_2 로 구분하는 경우 모델은 다음과 같이 제시된다.

$$\begin{aligned} \max_c \int_0^{\infty} e^{-\delta t} [V - u_1 \alpha - u_2] \cdot c \cdot P_2 \cdot dt \\ \dot{P}_1 = b_1 \cdot P_2 - e \cdot P_1 \cdot P_2 - d_1 \cdot P_1 + \alpha \cdot c \cdot P_2 \\ \text{s. t.} \quad \dot{P}_2 = b_2 \cdot P_1 - k_2 \cdot P_2^2 - d_2 \cdot P_2 - c \cdot P_2 \\ \dot{V} = f(V, cP_2) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 4)$$

단 이 모델은 식 3)과 비교해 볼 때, 다음과 같은 두 가지 점에서 차이점을 보인다. 첫째, 참계의 가격을 식 2)에서와 같이 파라미터(외생변로)로 놓지 않고 내생화시켜서 소문자 v 대신 대문자 V 로 명명하고 새로운 수준변수(state variable)로 모델링하였다. 그 결과 가격 V 의 변화방정식은 제약식의 맨 마지막에 제시된 바와 같이 수확량의 변화와 가격수준 그 자체의 함수로 설정하였다. 이러한 함수형태는 수요량이 가격에 비탄력적이며 공급량의 변동

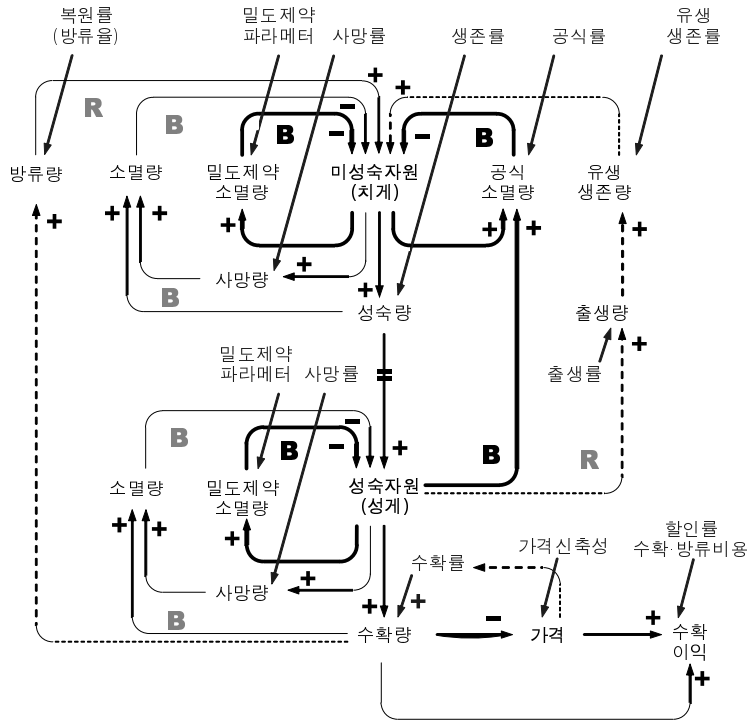
에 영향을 받는 농수산물에 적합한 가장 간단한 형태의 가격 신축성 함수(김명환 외, 2000)로서, 지수함수의 형태로서 자연대수(natural log)를 취할 경우 Moxnes (2005) 및 Hanson & Ryan (1998)의 연구에서 보는 선형 가격변화식과 같은 의미로 보여진다.

두 번째의 차이점은 식 3)에서는 수확비용 u 가 자원량 P 의 함수로 모델링되었는데 반해 식 4)에서의 수확비용 u_2 는 파라미터로 놓았다는 것이다. 생물경제학에서는 일반적인 어획 방법에 따라 식 1)의 비용함수 u 는 수확노력(harvest effort)에 소요되는 수확비용이 자원량에 반비례한다는 가정에 따르지만, 본 연구에서의 방류비용이 치게 1미당 300원으로 고정되어 있으며 수확비용의 경우 역시 금강에서의 참게의 조업방식인 여가시간에 통발 설치 등으로 사실상 거의 비용이 들지 않거나 혹은 수확량에 비례한다고 볼 수 있기 때문이다.

4. 참게 목장화 사업의 구조 모델

[그림 1]에 식 4)로 표현된 최적화 모델의 동적 역학관계 구조를 표시한 인과지도가 제시되어 있다. 인과지도는 시스템 구조에 대한 일종의 마인드 맵(mind map)이므로 분석자가 이미 추구하는 인과지도를 먼저 도출하고, 앞서 논한 수리적 모델들을 도출하는 것이 상당히 일반적이나, 본 연구에서는 수리적 모델을 중심으로 하는 생물수학 및 생물경제학 이론 모형들에 기초하므로 수리모델을 먼저 도출하였고, 이를 토대로 위의 인과지도를 작성하였다. 방법의 선후가 크게 중요한 것은 아니라고 생각되며, 이미 선행연구(정희성·전대욱, 2006)에 이와 유사한 인과지도가 설명되어 있으므로 이에 대한 자세한 설명은 생략하기로 한다.

다만, 금강 참게 생태계는 하구둑으로 자연번식이 어려우므로, 성숙자원(성게)의 교미와 포란을 통한 유생의 출생은 추후 어로개설 등을 염두에 두고 일단 점선으로 표시하였다. 아울러 이론모델에서 논의한 바와 같이 방류량이 정책적 정량방류량이 아닌 장기적으로 수확량에 의해 결정되는 구조를 감안하여 이 피드백 역시 점선으로 표기하였고, 수확물 역시 수확이윤의 극대화라는 장기적인 관점에서 가격수준에 의해 영향 받는 피드백 역시 점선으로 표기하였다. 그림에서 가격 신축성 함수는 간단한 지수함수 형태로서 절편과 수확량의 변화율에 따른 변화계수가 파라미터로 새로 표시되었다.



[그림 1] 참계 목장화 사업의 시스템 구조(causal loop diagram)

Ⅲ. 금강 참계 생태계의 동적균형과 파라미터 추정

1. 동적 균형조건인 중요성에 관한 기초

동적 균형상태는 시스템 내의 모든 저장변수들이 동시에 변화가 없는 상태를 의미한다. 앞서 논한 식 1)의 시스템을 예로 들면 다음과 같다.

$$\dot{P} = rP - \frac{r}{K}P^2 - cP \quad \dots\dots\dots 1)$$

이 때 즉, 이 경우에는 유일한 저장변수 P에 대해 $\dot{P} = 0$ 이 되는 상태를 동적 균형상태라 칭한다. 동적 균형상태는 유량이 0가 되어 저장변수(수준변수)가 더 이상 변화가 없는 상태를 의미하며, 이 동적 균형상태는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\bar{P}} = 0 : 0 = (r-c)\bar{P} - \frac{r}{K}\bar{P}^2 = \bar{P}\left[(r-c) - \frac{r}{K}\bar{P}\right] \quad \dots\dots\dots 5)$$

$$\therefore \bar{P} = 0 \text{ or } \left(\frac{r-c}{r}\right) \cdot K$$

즉 동적 균형이 되는 값 개체수를 \bar{P} 라 할 때, 위의 식 1)에 좌변에 0을 대입하고 우변을 정리하면 우변은 2차식이 되고, 전체적으로 2차 방정식이 된다. 이 2차 방정식을 풀면 두 개의 동적 균형점을 얻는다. 이 때 0은 자명해(trivial solution)로서, 개체수가 우연히 0이 되어서 출생량도 밀도제약 소멸량도 수확량도 없으면 값이 변하지 않는 너무 자명한 해이다. 이 해 외의 동적 균형점은, 출생률 r 과 출생률에서 수확률을 제한 실질적 출생률 $(r-c)$ 의 비에 최대개체수를 곱한 것으로서, 이 비는 c 가 음수가 될 수 없어 1보다 같거나 작으므로 동적 균형점은 최대개체수보다 같거나 작은 수준에서 결정된다. 여기서 수확률 c 가 커지면 그만큼 동적 균형수준 개체수는 작아지게 된다.

여기서 중요한 점은 몇 가지가 있으나, 여기서는 다음의 논의를 위해 두 가지만 언급하기로 한다. 첫째, 이 동적 균형점(이 안정적이라면, 이 점)은 시스템의 ‘끌개’가 될 것이다. 저장변수의 초기 값을 어떻게 조정해도 파라미터의 값을 바꾸지 않는 한 결국은 이 수준으로 회귀된다는 의미에서 이 점으로 끌어당긴다는 표현을 썼다. 다만 파라미터의 값을 바꾸면 동적 균형점이 바뀌게 되며, 파라미터 값의 변화에 따른 균형점의 변화로부터 이 균형점의 안정성을 논할 수 있으나 여기서는 생략하기로 한다.

두 번째는, 동적 균형점이 ‘기지의 파라미터로부터 결정’된다는 것이다. 위의 식에서 내생변수의 동적 균형점은 일반적으로 우리가 다루는 시스템에서 풍부한 조절루프(balancing loop)를 가질 때 값이 발산하지 않고 어느 한 수준으로 수렴하는 동적 균형상태에 이르게 되는데, 이 동적 균형상태는 시스템에서 우연히 만들어진 것이 아니라, 이미 주어진 수리모델의 함수형태와 기지의 파라미터에서 결정된다는 것을 의미한다. 따라서 종종 ‘초기 균형조건’을 가정한 시뮬레이션 — 특히 시스템의 외생 충격에 대한 안정성 실험 — 에서 저장변수의 초기값을 구체적인 수치로 입력하지 않고 파라미터(그리고 다른 저장변수의 초기값 등)의 함수로 설정하는 경우가 존재하는데, 이 함수는 바로 연구자가 이러한 동적 균형조건을 사전에 계산하여 초기에 이러한 균형조건이 성립한다는 가정 하에 설정한 것이다.

그러나 대체로 연구자들이 다루는 모델이 복잡한 경우가 많아 과연 위와 같이 쉽게 풀릴 것인가가 항상 문제일 것이다. 대체로 연구자들이 다루는 모델은 저장변수도 많고 — 즉 위의 1변수 1방정식이 연립방정식이 되고, 저장변수의 변화식(유량 방정식, flow equation) 역시 식 1)에서의 제곱항과 같은 비선형식이 종종 포함되어 있으므로 매우 복잡한 연립방정

식이 될 것이다. 모델의 개발자는 종종 이러한 문제를 회피하기 위해 가급적 선형적 유량 변화와 간단한 형태의 식을 세우고 싶어 하나, 역으로 이러한 모델링은 비선형 피드백의 풍부한 시스템 행태를 제한하는 대가를 치러야 한다.

2. 본 연구에서의 동적 균형상태

그러나 식 2) 혹은 4)로 표현된 본 연구의 생태계 모델에서는 P_1 과 P_2 라는 두 저장변수만을 포함하므로 동적 균형상태에 대한 위와 같은 해석적 접근(analytical approach)이 가능하다. 본 모델에서 일단 모든 파라미터는 비음(non-negative)임을 가정하면, 식 2)의 연립미분방정식 시스템에서 두 저장변수가 변화가 없는 동적 안정상태에 대한 조건식, 즉 두 좌변을 동시에 0으로 놓고, P_i 대신 \bar{P}_i 를 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 = 0 : \quad 0 &= (b_1 + \alpha \cdot c)\bar{P}_2 - (e\bar{P}_2 + d_1)\bar{P}_1 & \dots\dots\dots 6) \\ \dot{P}_2 = 0 : \quad 0 &= b_2\bar{P}_1 - k_2\bar{P}_2^2 - (d_2 + c)\bar{P}_2 \end{aligned}$$

여기서, 식 6)의 두 번째 식은 다음과 같이 변형할 수 있는데, 복잡함을 회피하기 위해 생태적 소멸률 d_2 와 경제적 소멸률인 수확률 c 를 합친 $(d_2 + c)$ 를 생태경제적 소멸률 d_2' 로 치환한다면 다음과 같다.

$$\bar{P}_1 = \frac{1}{b_2} \cdot \bar{P}_2 \cdot (k_2\bar{P}_2 + d_2') \quad \dots\dots\dots 7)$$

이 식 7)을, P_1 을 소거하기 위해 식 6)의 첫 번째 식에 대입하면,

$$0 = (b_1 + \alpha \cdot c)\bar{P}_2 - (e\bar{P}_2 + d_1) \cdot \left[\frac{1}{b_2} \bar{P}_2 (k_2\bar{P}_2 + d_2') \right]$$

을 얻게 된다. 혼잡을 피하기 위해 마찬가지로 생태적 증가율인 출생률 b_1 과 인위적 증가율인 방류율 $\alpha \cdot c$ 를 합한 것을 생태경제적 증가율 b_1' 로 치환하여 이 식을 정리하면, 다음과 같은 3차 방정식을 얻는다.

$$0 = \bar{P}_2 \left[b_1' - \frac{(e\bar{P}_2 + d_1)(k_2\bar{P}_2 + d_2')}{b_2} \right]$$

그 중 $\bar{P}_2 = 0$ 은 자명해(trivial solution)이므로 논의에서 제외하기 위해 양변을 \bar{P}_2 로 나누고 괄호를 풀어 정리하면 다음의 식 8)과 같다.

$$0 = \bar{P}_2^2 + \left(\frac{d_1}{e} + \frac{d_2'}{k_2} \right) \bar{P}_2 - \left(\frac{b_1' b_2}{e k_2} - \frac{d_1 d_2'}{e k_2} \right) \quad \dots\dots\dots 8)$$

식 8)로 표현된 2차 방정식의 해는 근의 공식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{P}_2 &= -\frac{1}{2} \left(\frac{d_1}{e} + \frac{d_2'}{k_2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{d_1}{e} + \frac{d_2'}{k_2} \right)^2 + 4 \left(\frac{b_1' b_2}{e k_2} - \frac{d_1 d_2'}{e k_2} \right)} \\ &= -\frac{1}{2} \left(\frac{d_1}{e} + \frac{d_2'}{k_2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{d_1}{e} - \frac{d_2'}{k_2} \right)^2 + 4 \frac{b_1' b_2}{e k_2}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 9)$$

여기서 모델의 모든 파라미터가 비음이 되도록 모델링하였으므로, 루트 안은 언제나 0보다 크고 두 개의 실근이 존재한다. 다만 하나의 실근은 음수임이 확실하나 개체수가 음수가 되는 것은 의미가 없으므로, 성계의 동적 균형이 존재하려면 나머지 한 근이 반드시 양수가 되어야 한다. 즉,

$$\begin{aligned} \bar{P}_2 &= -\frac{1}{2} \left(\frac{d_1}{e} + \frac{d_2'}{k_2} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{d_1}{e} - \frac{d_2'}{k_2} \right)^2 + 4 \frac{b_1' b_2}{e k_2}} > 0 \\ \Rightarrow \left(\frac{d_1}{e} + \frac{d_2'}{k_2} \right) &< \sqrt{\left(\frac{d_1}{e} - \frac{d_2'}{k_2} \right)^2 + 4 \frac{b_1' b_2}{e k_2}} \\ \Rightarrow \left(\frac{d_1}{e} + \frac{d_2'}{k_2} \right) &< \sqrt{\left(\frac{d_1}{e} + \frac{d_2'}{k_2} \right)^2 + 4 \left(\frac{b_1' b_2}{e k_2} - \frac{d_1 d_2'}{e k_2} \right)} \\ &\therefore b_1' b_2 > d_1 d_2' \quad \text{or} \quad (b_1 + \alpha \cdot c) \cdot b_2 > d_1 \cdot (d_2 + c) \quad \dots\dots\dots 11) \end{aligned}$$

요컨대 도출된 성계의 동적 균형개체수 \bar{P}_2 는 치계 및 성계 각 단계의 생태경제적 파라미터의 함수이며 이 동적 균형이 존재하려면, 각 단계의 생태경제적 생성물의 공급이 각 단계의 생태경제적 소멸률의 공급보다 커야만 한다. 도출된 \bar{P}_2 를 식 7)에 대입하면 마찬가지로 치계의 동적 균형개체수인 \bar{P}_1 을 얻을 수 있다. 이 과정을 포함하여, 일반적으로 미분방정

식론에서 수행하는 도출된 균형점의 안정성(stability)에 관한 선형근사적 접근 등은 본 논문에서는 생략한다.

3. 동적 균형조건을 가정한 금강 지천의 참개 생태계 파라미터 추정

파라미터를 추정하기 위한 자료로서 금강 지천의 참개 생태계에 관한 정보는 대단히 제한적이므로, 동적 균형상태에 대한 정보를 최대한 활용하여 추정해야 하는 것이 본 연구의 중요한 특징 중의 하나였다. 우선 파라미터를 추정하기 위해 알려져 있는 금강 지천의 참개 관련 정보는 몇 가지 외에는 알려져 있지 않았고, 현재 수준에서 추가적인 조사와 실험이 수반되지 않는다면 알 수 없는 상태였다. 알려진 몇 가지의 정보는 다음과 같다.

- 정보 1) 2년이 지나 다 자란 성개 중 생식기가 성숙하지 못해 하류로 이동하지 않고 동면하는 성개의 비율은 20%로 알려져 있다(신현욱 · 김현우, 2007: 20).
- 정보 2) 논과 하천 등 지천의 서식면적을 고려한 수확량의 총량은 770.6천 마리이다(신현욱 · 김현우, 2007: 53-54).
- 정보 3) 수확량 770.6천 마리를 수확하기 위해서는 수확 2년 전 2753.0천 마리의 치계를 방류해야 한다(신현욱 · 김현우, 2007: 53-54).

이상의 세 가지 정보만을 가지고 파라미터를 추정하기 위해 우선 금강의 상황에 맞게 식 2)를 다음과 같이 단순화시켰다.

- 전제 1) 금강 하구언으로 인해 번식이 불가능하므로 치계의 생태적 출생률 $b_1 = 0$ 으로 설정하였고,
- 전제 2) 방류는 목장화 사업을 시행을 가정하여 매년 최대량인 2753.0천 마리를 정량 방류하는 것, 즉 $a \cdot cP_2$ 대신 정량방류량 $a = 2753$ 로 치환하였다.
- 전제 3) 치계의 소멸은 공식에 의한 밀도제약 외에는 없는 것으로 가정, 즉 치계는 밀도제약에 의해 희생당하거나 혹은 모두 성장하여 성개가 된다는 가정 하에 $b_2 = d_1$ 으로 설정하여 큰 의미가 없는 추정대상 파라미터의 수를 제한한다.

이렇게 단순화된 모형은 식 11)에 제시된 바와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 &= \alpha - eP_1P_2 - d_1P_1 \\ \dot{P}_2 &= d_1P_1 - \frac{d_1}{K_2}P_2^2 - d_2'P_2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 12)$$

금강에서는 이동한 성게들이 하구둑으로 인해 포란하지 못하고 하류 쪽에서 모두 죽음을 맞이할 것이므로 이들을 전량 수확해도 무방하며, 오히려 수확하지 않는 것이 손해일 수 있다. 따라서 금강의 하구둑 특성상 식 11)에서의 d_2' 와 같이, 이를 식 2)의 $(d_2 + c)$ 와 같이 자연사망률과 수확률을 굳이 나눌 필요 없이 일치시키는 것이 바람직하다. 따라서 전량수확을 전제 하에 별도의 수확률을 따로 생각하지 않을 때, 추정해야 할 파라미터는 e, d_1, K_2, d_2' 이다. 이 네 개의 파라미터의 추정은 다음과 같다.

추정 1) 위의 정보 1)에 의하면 성게의 개체수의 20%가 성게로 잔류하므로, 나머지 80%는 포란을 위해 하류로 이동하는 개체이다. 따라서 성게스톡 P_2 의 소멸률은 80%이다. 즉 $d_2' = 0.8$ 이다.

추정 2) 위의 정보 2)에 의하면 성게 P_2 의 최대수확량은 770.6천 마리인데, 이는 성게 P_2 의 80%로서 성게스톡에 잔류·동면하는 나머지 20%의 성게들은 192.7천 마리이다. 따라서 770.6천 마리와 192.7천 마리를 합한 성게 P_2 의 총 개체수는 963.3천 마리이다. 이 수치는 최대개체수 K_2 인 동시에 이 사업을 매년 반복해서 이 수치가 유지된다는 것을 가정해 보면, 성게의 동적 균형개체수 \bar{P}_2 가 된다. 즉, $\bar{P}_2 = K_2 = 963.3$ 천 마리다.

이제 나머지 두 파라미터 치게소멸률 d_1 및 공식률 e 는 나머지 하나의 정보, 즉 정보 3)인 성게 770.6천 마리를 수확하기 위해 필요한 치게방류량이 2735.0천 마리라는 사실을 활용해야 한다. 우선 치게소멸률 d_1 이란 성게로의 성숙률(=성게생성률 b_2)을 의미한다. 동적 균형상태를 가정하면, 성게스톡 P_2 의 유일한 유입량(inflow)인 다 자란 신규 성게들의 편입량 $d_1 \cdot P_1$ 과, 두 종류의 유출량(outflow) — 밀도제약으로 희생되는 성게들 $(d_1/K_2) \cdot P_2^2$ 및 교미·포란을 위해 하류로 이동하여 죽음을 맞이하는 성게들 $d_2' \cdot P_2$ — 의 합이 일치해야 한다. 즉 다음과 같다.

$$\dot{P}_2 = 0: \quad 0 = d_1 \cdot \bar{P}_1 - \frac{d_1}{K_2} \cdot \bar{P}_2^2 - d_2' \cdot \bar{P}_2 \quad (\text{단, } d_2' = d_2 + c) \quad \dots\dots\dots 13)$$

여기서 $d_2' \cdot P_2$ 는 770.6천 마리라고 알고 있으나, 밀도제약으로 희생되는 성계들의 경우 추정 2)의 결과를 대입해도 여전히 $d_1 \cdot (963.3$ 천 마리)로서 d_1 에 의존하며 편입량 $d_1 \cdot P_1$ 도 d_1 에 의존한다. 다만, 이것으로부터 식 13)과 같이 d_1 에 대한 정보- d_1 은 치계의 동적 균형수준인 \bar{P}_1 의 함수임을 알 수 있다.

$$0 = d_1 \cdot \bar{P}_1 - \frac{d_1}{(963.3)} \cdot (963.3)^2 - 770.6 \quad \therefore d_1 = \frac{770.6}{\bar{P}_1 - 963.3} \quad \dots\dots\dots 14)$$

마찬가지로 공식률 e 역시 동적 균형상태를 가정하여 이러한 관계를 도출할 수 있다.

$$\dot{P}_1 = 0: \quad 0 = \alpha - d_1 \cdot \bar{P}_1 - e \cdot \bar{P}_1 \cdot \bar{P}_2 \quad \dots\dots\dots 15)$$

식 15)를 식 13)과 합하여, $d_1 \cdot \bar{P}_1$ 를 소거하면 식 16)의 결과를 얻는다. 식에서 공식률 e 역시 d_1 및 치계의 동적 균형수준인 \bar{P}_1 의 함수임을 알 수 있다.

$$0 = 2753.0 - e \cdot \bar{P}_1 \cdot (963.3) - \frac{d_1}{(963.3)} \cdot (963.3)^2 - 770.6 \quad \dots\dots\dots 16)$$

$$\therefore e = \frac{1}{\bar{P}_1} \left(\frac{2753.0 - 770.6}{963.3} - d_1 \right)$$

따라서 치계의 동적 균형수준 \bar{P}_1 을 알 수 있다면 치계소멸률 d_1 및 공식률 e 를 추정하는 것이 가능하다. 상식적으로 치계의 소멸률 d_1 은 참계의 전체 평균수명이 2년 혹은 그 이상으로 알려져 있으므로, 치계가 성숙해서 성계까지 걸리는 시간지연 파라미터의 역수라고 볼 수 있는 d_1 은 대략 0.5 근방의 0.5보다 약간 더 작은 수준의 수치가 될 것이라는 점이다. 이를 이용하여 식 14)를 다시 쓰면,

$$0.5 \cong \frac{770.6}{\bar{P}_1 - 963.3} \quad \Rightarrow \quad \bar{P}_1 \cong 2504.5 \quad \dots\dots\dots 17)$$

식 17)에서 d_1 이 0.5일 때 치계의 동적 균형개체가 대략 2,500천 마리 정도임을 알 수 있다.

전제 4) 본 연구에서는 실제로 d_1 이 0.5 근방의 보다 작은 값을 고려할 때 더 이상의 정보를 취할 수 없어, 이와 유사한 수치인 정보 3)의 방류량 2,753.0천 마리를

치계의 동적 균형개체수 \bar{P}_1 으로 인식한다. 실제로 참게의 자연번식률이 0인 상태에서 매년 2753.0천 마리를 방류할 때, 강에 서식하는 치계가 2753.0천 마리라고 말하는 것은 매우 상식적으로 받아들일 수 있다.

추정 4) 위 전제 4)의 치계의 동적 균형개체수 $\bar{P}_1 = 2753.0$ 천 마리를 식 14)에 대입하면 $d_1 = 0.4306$ 을 얻는다.

추정 5) 위 전제 4) 및 추정 4)의 추정 치계의 동적 균형개체수 $\bar{P}_1 = 2753.0$ 천 마리 및 $d_1 = 0.4306$ 을 식 16)에 대입하면 $e = 5.911 \times 10^{-4}$ (즉, 0.0005911)을 얻는다.

마지막으로, 앞서 전제 1) 및 전제 2)를 통해 금강 하구둑의 존재로 $b_1 = 0$ 임을 밝힌 바 있다. 그러나, 지금이 하구둑이 없는 원시 균형상태임을 가정하면 어떨까? 치계의 동적 균형수준 2753.0천 마리와 성계의 동적 균형수준 963.3천 마리, 포란·교미 후 폐사하는 성계의 개체수 770.6천 마리를 유지하기 위해서는 이 인위적인 방류량만큼 자연적인 재생산이 이루어져야 한다. 즉 식 12)의 첫 번째 식에서 인위적 방류량 a 대신 $b_1 \cdot P_2$ 를 대입하면,

$$\dot{P}_1 = 0 : 0 = b_1 \bar{P}_2 - e \bar{P}_1 \bar{P}_2 - d_1 \bar{P}_1 \quad \text{----- 18)}$$

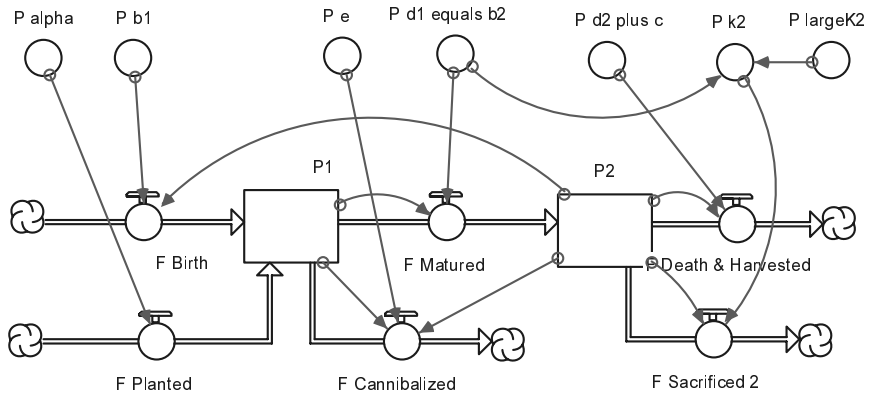
식 18)을 얻게 된다. 이 식에 앞서 추정된 동적 균형수준과 각 파라미터를 대입하면 자연출생률 b_1 을 구할 수 있다.

추정 6) 식 18)에 $\bar{P}_1 = 2753.0$, $\bar{P}_2 = 963.3$, $e = 0.0005911$, $d_1 = 0.4306$ 등을 대입하면 $b_1 = 2.8579$ 를 얻는다.

즉, 약 암수 한 쌍이 약 40~50만 개의 포란을 하는데, 성계 마리당 2.8579의 치계를 생산하므로, 포란부터 부화, 유생의 단계를 거쳐 강을 거슬러 올라오면서 치계로 성장하기까지 대부분의 유생들이 희생됨을 알 수 있다. 참고로, 이 생존률이 상당히 높아진다면, 정회성·전대욱(2006)에서 지적한 바와 같이 치계의 비선형 성장곡선은 분기현상(bifurcation), 즉 복수의 동적 균형수준을 가지면서 카오스적 시스템 행태를 가질 수 있을 것이다.

4. 추정된 파라미터 값에 기초한 실험과 시스템의 타당성

이상과 같은 파라미터 및 초기값에 대해서 동적 균형조건을 만족하는지 Stella 7.0.3의 Euler 근사해법(DT=0.01)을 활용한 실험을 수행하였다. 실험모델은 다음과 같다.



$$P1(t) = P1(t-dt) + (F_Birth + F_Planted - F_Matured - F_Cannibalized) * dt$$

$$INIT P1 = (1/P_d1_equals_b2)*P2*(P_k2*P2 + P_d2_plus_c)$$

$$INFLOWS: F_Birth = P_b1*P2$$

$$F_Planted = P_alpha$$

$$OUTFLOWS: F_Matured = P_d1_equals_b2*P1$$

$$F_Cannibalized = P_e*P1*P2$$

$$P2(t) = P2(t-dt) + (F_Matured - F_Death_ \& _Harvested - F_Sacrificed_2) * dt$$

$$INIT P2 = 0.5*(((P_d1_equals_b2/P_e) - (P_d2_plus_c/P_k2))^2 +$$

$$4*(P_b1/P_e)*(P_d1_equals_b2/P_k2))^0.5$$

$$- 0.5*(P_d1_equals_b2/P_e + P_d2_plus_c/P_k2)$$

$$INFLOWS: F_Matured = P_d1_equals_b2*P1$$

$$OUTFLOWS: F_Death_ \& _Harvested = P_d2_plus_c*P2$$

$$F_Sacrificed_2 = P_k2*(P2^2)$$

$$P_alpha = \text{경우 1) } 2753.0 \quad ; \quad \text{경우 2) } 0$$

$$P_b1 = \text{경우 1) } 0 \quad ; \quad \text{경우 2) } 2.8579$$

$$P_d1_equals_b2 = 0.4306 \quad ; \quad P_d2_plus_c = 0.8 \quad ; \quad P_e = 0.0005911$$

$$P_k2 = P_d1_equals_b2/P_largeK2 \quad ; \quad P_largeK2 = 963.3$$

[그림 2] 생태계 실험모델과 Stock-Flow Equations

[그림 2]의 실험모델과 수식에서는 P_1 및 P_2 스톡의 초기값으로 III장 2절에서 도출한 초기 균형조건인 식 7)과 식 10)을 활용하였다. 아울러 P_{α} (이론모델의 α) 및 P_{b_1} (이론모델의 b_1)은 두 가지를 가정하고 있다.

경우 1) III장 3절 초반부와 같이 하구둑으로 자연재생률 $b_1 = 0$ 및 방류량 $\alpha = 2753.0$

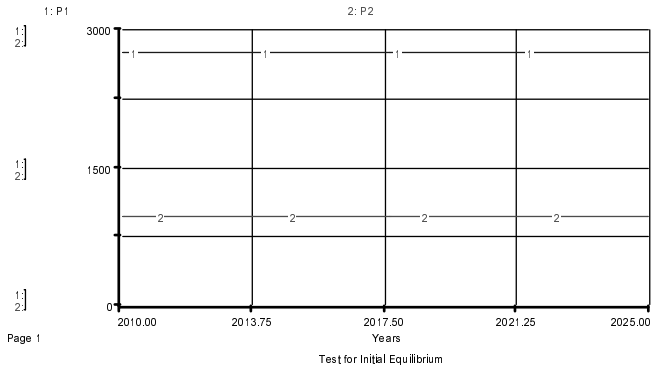
경우 2) III장 3절 후반부와 같이 원시균형상태 자연재생률 $b_1 = 2.8579$ 및 방류량 $\alpha = 0$

이 두 가지 경우의 동적 안정상태는 본질적으로 같은 의미이나, 자연재생률이 없는 상태에서 원시균형상태와 같은 자연재생량만큼을 방류하는 것이기 때문이다. 이 두 경우 모두 실험결과 [그림 3]과 같이 초기 균형상태를 잘 유지하고 있다.

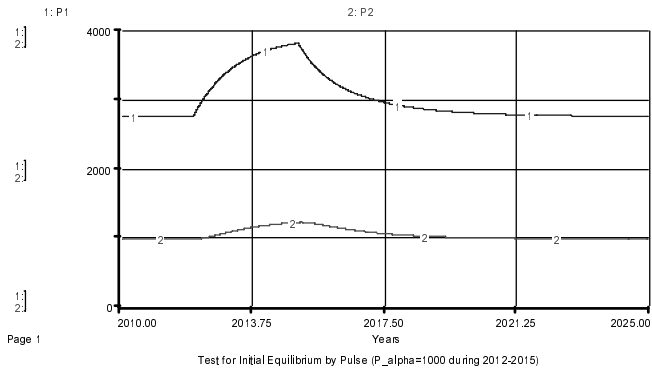
아울러 [그림 4]는 일시적인 외생충격이 가해졌을 때 시스템의 동적 균형회복에 관한 실험이다. 시스템에서 방류량을 2012~2015년 3년간 치계 1,000천 마리를 방류하고 이후 중단하는 경우에 관한 실험이다. 그림에서 보는 바와 같이, 일시적인 충격에도 불구하고 동적 균형수준을 회복하는 항상성(homeostasis)을 보이고 있다. 또한 [그림 5]는 파라미터의 함수로 이루어진 동적 균형조건이 파라미터 값이 영구적으로 변했을 때 그 균형값이 변함을 보이는 실험을 나타내고 있다. 실험의 실제적 의미는, 현재와 같이 금강 하구둑이 존재하여 방류를 해야 하는 경우 2012년부터 방류량을 계획된 2753.0천 마리/년 수준의 100%, 80%, 60%, 40%, 20%, 0%로 낮추는 경우 동적 균형수준이 어떻게 변하는지를 보는 것이다. 만약 원시상태라면, 자연번식률 b_1 이 현재수준에서 2012년 오염 등으로 위와 같이 낮아지는 경우의 동적 균형점의 변화로 해석할 수 있다. 그림의 실험은 성계의 동적 균형수준의 80%에 해당하는 포란·교미를 위해 이동하는 포획대상 성계의 변화를 나타내고 있다.

이상의 실험결과로부터 모델의 구조적 타당성과 행태적 타당성(Deaton et al., 2000: 74-77; Ford, 1999: 283-288; Barlas, 1996)에 대한 어느 정도의 자신감을 가질 수 있다. 물론 분석자는 모델과 분석결과의 타당성 제고를 위해 분석이 끝나는 순간까지 긴장감을 늦출 수 없지만, 본 연구에서는 모델 인프라구조(인과 및 수리모델, 측정 및 실험단위와 가정 등)에 대한 타당성을 제고하기 위해 기존의 이론적 모델링 및 실제적 자료들을 최대한 활용하였고, 제한된 정보 내에서 이와 일관되도록 파라미터 추정을 수행함으로써 모델의 구조적 타당성(structural validity)을 제고시키기 위한 노력을 아끼지 않았다.

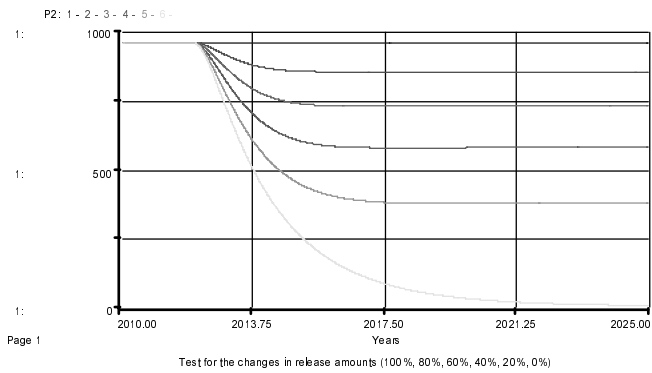
아울러 모델의 예측적 타당성(predictive validity)에 있어서도 본 절에서 수행한 동적 균형상태 분석결과를 통해, 아울러 본 절에서는 자세히 다루지 않았으나 파라미터의 극단값에 대한 테스트에서도 시스템 구조와 일관되는 등, 상식적 및 이론적으로 정확한 실험결과를 보이고 있다는 측면에서 본 모델의 타당성의 제고를 위한 노력도 충분히 수행되었다고 볼 수 있다.



[그림 3] 도출된 초기 균형조건을 유지 실험



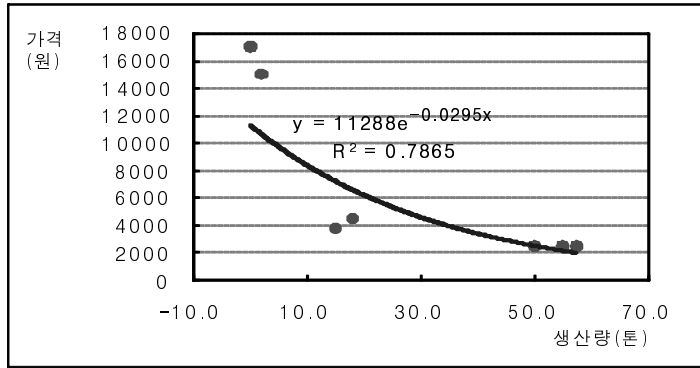
[그림 4] 동적 균형수준의 일시적 충격에 대한 균형회복 실험



[그림 5] 파라미터 변화에 따른 동적 균형수준의 변화 실험

IV. 금강 참게 목장화 사업의 실험분석

1. 사업의 경제성 평가를 위한 가격 신축성함수의 추정



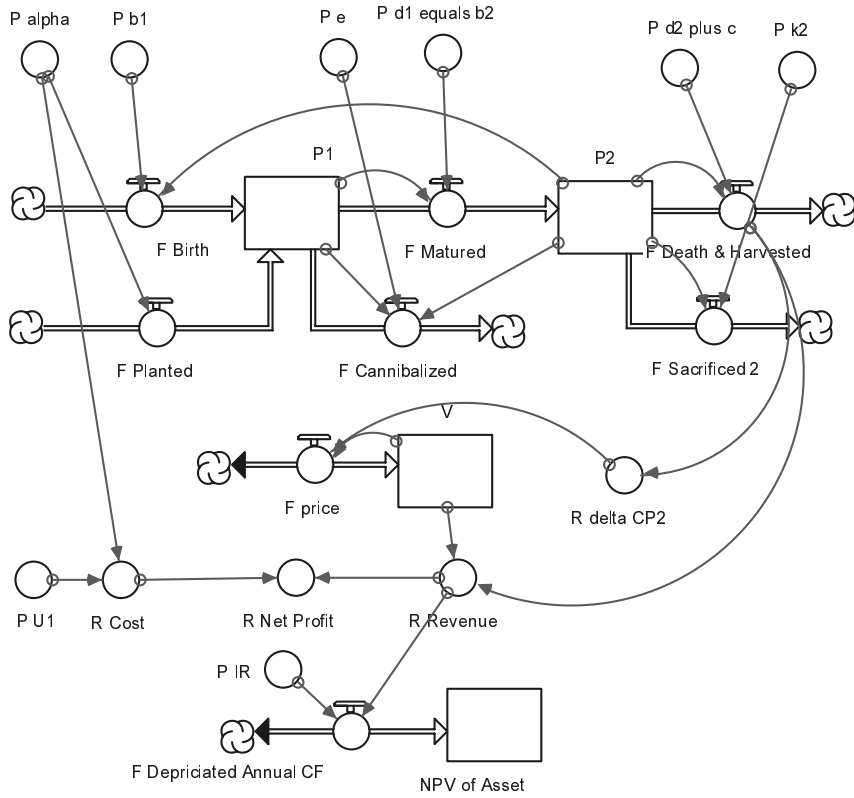
[그림 6] 참게의 가격신축성 함수 추정

금강 지천의 참게 목장화 사업의 경제성 평가를 위해, 식 4)에서 제시된 가격 신축성 함수의 추정이 필요하다. 참게는 섬진강 등지에서도 생산되나 동남참게로서 약간 다르며, 대부분의 유통량이 임진강과 금강을 중심으로 이루어진다. 그러나 금강의 경우 자연번식이 불가능하여 그간 소수의 사업자에 의한 소규모 간헐적인 방류 및 양식만 진행되어 가격 신축성 함수를 추정하기 위한 생산량과 가격의 정보에 대한 축적이 이루어지지 않았다. 참게에 대한 별도의 통계자료나 농수산물 도매시장의 거래정보가 존재하지 않은 관계로 본 연구에서는 임진강에서 비교적 규모가 큰 참게조업을 수행하는 파주 어촌계의 물량 및 가격 정보를 활용하여 추정하였다. 이는 참게홍보를 참게 품어철에 매년 주요 일간지에 관련 정보와 인터뷰 기사의 형태로 존재하는 정보를 취합한 자료이다.

이상과 같은 가격 신축성 함수를 [그림 2]로 제시한 실험모형에 삽입하기 위하여 가격 신축성 함수를 미분하여 식 19)와 같은 저량의 시간에 따른 변화식을 얻는다.

$$V = 11288 \cdot e^{-0.0295(CP_2)} \Rightarrow \frac{d}{dt}V \equiv \dot{V} = (-0.0295) \cdot \frac{d(CP_2)}{dt} \cdot V \quad \dots\dots\dots 19)$$

이를 III장 4절에서 제시한 Stella 모델에 추가시킨 것은 [그림 7]에 제시되어 있다. 가격 V의 초기값은 최근 3년간 도매가격의 평균인 2,500원/마리(마리당 100g 기준)로 설정하였으며, 본 논문의 I 장에서 제시한 바와 같이 사업유지를 위한 최소의 시장가격 마리당 1,000원을 하한으로 설정하였다([그림 7] 하단 박스의 IF함수 참조).



$$\begin{aligned}
 V(t) &= V(t-dt) + (F_price) * dt \\
 \text{INIT } V &= 2500 \\
 \text{INFLOWS:} \quad & F_price = \text{IF}(V - 0.0295 * R_delta_CP2 * V < 1000) \\
 & \quad \text{THEN}(1000 - V) \text{ ELSE } (-0.0295 * R_delta_CP2 * V) \\
 \\
 \text{NPV_of_Asset}(t) &= \text{NPV_of_Asset}(t-dt) + (F_Depreciated_Annual_CF) * dt \\
 \text{INIT NPV_of_Asset} &= 0 \\
 \text{INFLOWS:} \quad & F_Depreciated_Annual_CF = \\
 & \quad R_Revenue / ((1 + P_IR) ^ (\text{TIME} - 2010)) \\
 \\
 R_delta_CP2 &= \text{DERIVN}(F_Death_ \& _Harvested, 1) * DT \\
 P_IR &= 0.04 ; \quad P_U1 = 300 \\
 R_Net_Profit &= R_Revenue - R_Cost \\
 R_Cost &= P_alpha * P_U1 ; \quad R_Revenue = V * F_Death_ \& _Harvested
 \end{aligned}$$

[그림 7] 목장화 사업의 경제성 평가모델과 Stock-Flow Equations

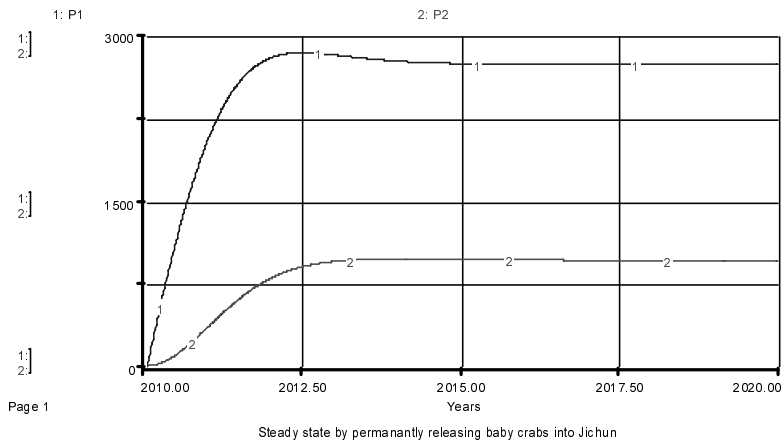
아울러 본 연구에서는 영구적 사업시행시 본 사업의 경제적 가치의 측정을 위해 피드백이 없는 자산의 현재가치(Net Present Value of the Asset)를 측정하기 위한 변수를 도입하였는데, 자산가치는 스톡으로, 시장할인률 P_IR (Interest Rate, 이론모델의 δ)은 0.4로, 단위방류비용은 치게 마리당 300원으로 설정하였다. 또한 이론모델에서 수확비용 u_1 은 앞서 밝힌 바와 같이 실제로 0이므로 본 모델에서는 제외했다. 마지막으로, 하기된 equation model에서 순이익(P_Net_Profit)은 연간 순이익을 의미한다.

2. 사업의 경제성 평가

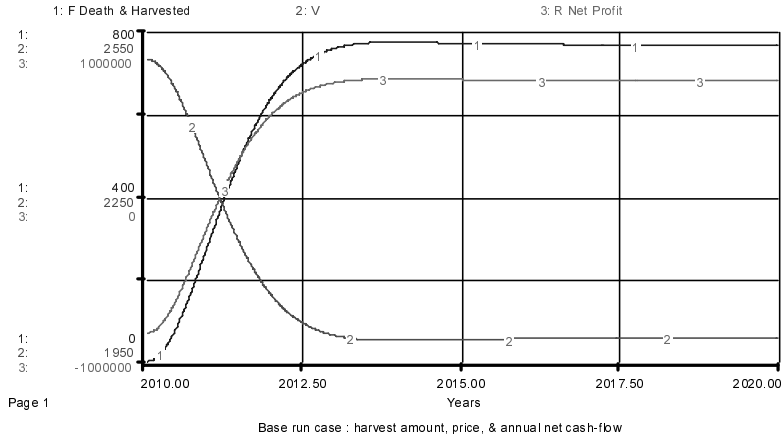
이상의 실험모델을 통해 금강 지천에서의 참게 목장화 사업에 대한 경제성 평가를 실시하였다. 경제성 평가는 참게 목장화 사업의 계획인 ① 연간 2753.0천 마리의 치게 방류, ② 연간 770.6천 마리의 하류로 이동 성게들을 모두 수확, ③ 이러한 사업을 영구적으로 시행을 전제로 한다.

[그림 8]과 [그림 9]는 금강 지천에서 참게 목장화 사업을 추진함에 따른 생태 및 경제적 변화에 관한 실험 결과이다. 매년 2753.0천 마리의 치게를 방류했을 때, 총 방류비용은 825,900천 원, 동적 균형가격은 대략 마리당 2천 원선(1991.4원/마리)에서 형성되었다. 그 결과로서 동적 균형상태에서 연간 총수익은 1,534,659천 원으로 추정되며, 연간 순이익은 708,759천 원으로 추정되었다. 동적 균형상태에서 연간 투자대비 연간 수익의 B/C Ratio는 1.86으로서 매우 경제성이 높은 사업으로 추정된다.

또한 영구적으로 이 사업을 추진하는 경우 금강 지천에서의 참게자산의 가치는, 이자율



[그림 8] 참게 목장화 사업 시행시 치게(1) 및 성게(2)의 개체수 변화



[그림 9] 참게 목장화 사업의 수확량(1), 가격변화(2), 연간 순이익(3)

4% 하에서 연간 순이익의 현재가치의 합으로 정의되는 본 분석에서는 37,375,000천 원으로 도출되었다. 이를 정리한 것이 <표 1>에 제시되어 있는데, 표에서는 이자율의 미세한 변동에 따르는 자산가치의 변화가 제시되어 있다. 이자율의 변동을 감안한 본 사업의 경제적 효과, 즉 지역 자산가치는 대략 3~400억 정도로 추산된다.

아울러 이상과 같은 경제성 분석에서 가격변화가 추정된 경제성 평가수치들에 얼마나 민감한지를 테스트하였다. <표 2>는 가격변화량을 현재보다 20%, 10%, 현재수준 유지, -10%, -20%씩 더 변화시켰을 때의 각종 경제성 평가항목들의 변화정도를 본 것이다. 가격변화가 현재 예상한 것 보다 더 심한 경우 균형가격의 변동폭이 더 커지면서 손익이나 자산가치를 낮추고, 가격변화가 덜 심한 경우 균형가격의 변동폭이 작아지면서 손익과 자산가치를 증대시키는 것을 알 수 있다. 그러나 전반적으로 표에서 드러나듯이 가격변화의

<표 1> 참게 목장화 사업의 경제성 분석 결과

(단위: 천 원)

이자율	동적균형 상태에서의 연간비용	동적균형 상태에서의 연간수익	동적균형 상태에서의 연간순이익	영구적인 사업진행시 총 자산가치
3.0%	825,900	1,534,659	708,759	50,145,000
3.5%				42,849,000
4.0%				37,375,000
4.5%				33,117,000
5.0%				29,713,000

〈표 2〉 참게 목장화 사업의 가격변화에 대한 경제성의 민감도

가격변화량	균형가격 (원/마리)	연간 목장화사업손익 (천 원)	영구진행시 자산가치 (백만 원)
120%	1902. 8	640,474	35,738
110%	1946. 6	674,230	36,547
100%(Baserun)	1991. 4	708,759	37,375
90%	2037. 2	744,080	38,220
80%	2084. 1	780,210	39,085

정도에 따른 경제성의 민감도는 그리 크지 않아 사업의 경제성 평가의 결과는 크게 달라지지 않는다.

3. 하천환경 변화를 가정한 분석 1 : 금강 하구둑의 어도개설 효과

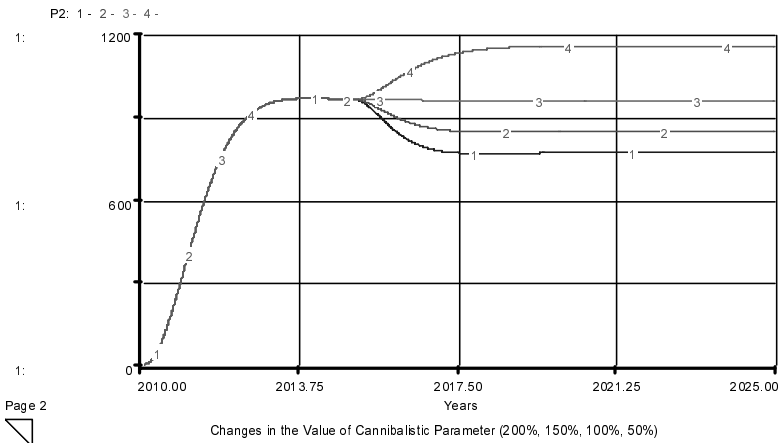
현재까지의 사업에 대한 전제와 분석은 금강 하구둑이 막혀 자연번식이 원천적으로 봉쇄된 경우를 전제로 하고 있다. 최근 시화호의 사례로부터 물길의 소통이 수질개선과 생태적 보전에 매우 중요한 역할을 한다는 것이 밝혀지고 있는데, 본 분석에서도 이러한 하구둑에 어도(fishways)가 개설되어 부분적으로나마 자연적인 번식이 가능한 경우를 생각할 수 있다.

이러한 어도개설의 효과는 단적으로 생태적 복원을 의미한다. 어도가 개설되어 자연출생률 b1이 일정부분이나마 회복되어 동적 균형상태가 0보다 크게 형성될 수 있음을 의미한다. 어도가 생기는 경우, 금강 지천에서의 참게 목장화 사업은 그 만큼의 치계의 새로운 균형개체수 만큼을 덜 방류하고 그 만큼 연간 방류비용을 절약할 수 있음을 의미한다. 예컨대 어도가 개설되어 치계의 최대 동적 균형개체수인 2753.0천 마리의 50% 수준에서 새로운 균형이 회복되는 경우 전체 방류비용의 50%를 줄일 수 있음을 의미한다.

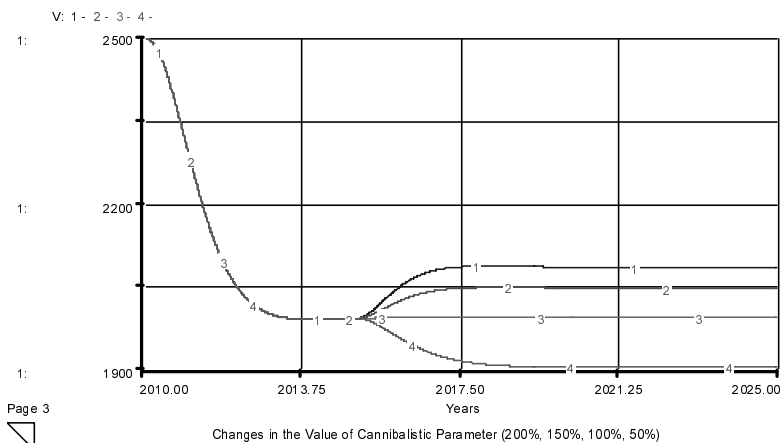
전 절의 경제성 분석에서 자산가치는 이러한 어도의 개설에 따른 경제적 편익의 추정치와 일맥상통한다. 앞서 예에서 방류량의 50%를 줄일 수 있다면, 생산량이 고정되어 있으므로 가격이나 수익 측면에서는 변화가 없고 방류비용에서만 절감이 이루어지므로 이에 따른 순이익의 증가가 자산가치를 상승시킨다. 예컨대 연간 비용의 연간 비용의 50%인 4.13억 원이 절약되어 이러한 이윤이 매년 추가된다면, 자산가치가 (4.13억 원 / 4%) = 103억 원만큼 증대된다고 할 수 있고 위 모델에 근거한 실험에서도 마찬가지로의 결과를 보인다.

4. 하천환경 변화를 가정한 분석 2 : 기후변화로 인한 공식률 증가의 리스크

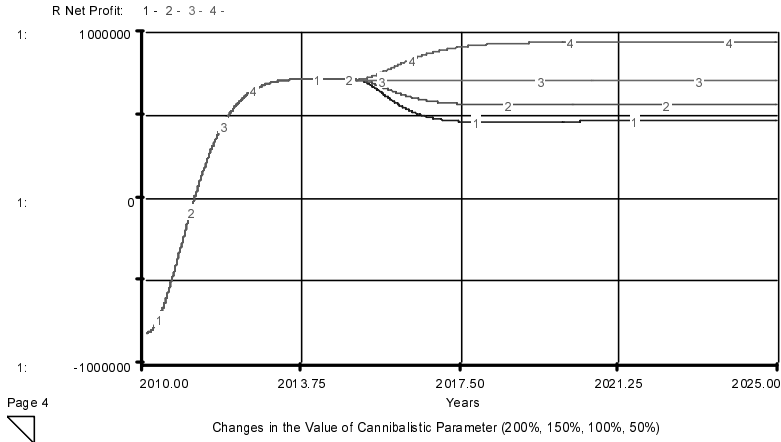
기후온난화에 의한 수온상승은 참게의 서식환경 변화와 불안정성을 야기시켜 참게의 공식률을 높이는 결과를 가져온다. 구체적으로 수온이 1도 상승하였을 때 공식률이 얼마나 증가하는지에 대한 거의 알려진 바가 없으므로, 본 연구에서는 간단히 현재 수준이 지속되다가 2015년경 참게의 공식률을 현재수준보다 200%(그림에서 1번선), 150%(2번), 100%(3번), 50%(4번)로 변화시켰을 때 나타나는 생태경제적 효과를 민감도 분석하여 제시하고, 이로부터 추후의 상황변화에 대한 시스템의 행태적 변화를 음미해 본다.



[그림 10] 수온상승으로 인한 공식률 증가의 효과(성계 개체수)



[그림 11] 수온상승으로 인한 공식률 증가의 효과(가격)



[그림 12] 수온상승으로 인한 공식물 증가의 효과(연간 순이익)

[그림 10]은 성게 개체수의 변화를 나타내고 있다. 2015년경 현재 수준보다 공식물이 더 커지는 경우, 그만큼 치게의 개체수가 급격히 줄어들면서 성게의 개체수도 시차를 두고 줄어드는 행태를 보이고 있다. 성게의 개체수가 줄어들면서 [그림 11]에서 나타나듯이 가격이 상승하나, 전체적인 수익은 [그림 12]에서 보이듯이 감소하는 행태를 보인다.

요컨대 온난화에 의한 수온의 상승으로 인한 본 사업의 리스크는, 현재보다 공식물이 약 2배 정도 증가하는 경우 연간 순이익에서 약 2억 정도의 손실이 예측된다고 할 수 있다.

V. 결론

본 연구의 관심대상인 참게의 경우 생물자원으로서, 이러한 자원을 대상으로 한 분석은 주로 기존의 환경자원경제 혹은 생물경제·생물수학적 모델이었다. 그러나 본 연구의 분석 대상인 금강이 하구둑의 존재로 인해 자연적 번식이 불가능하여 이러한 다이내믹 시스템 모델을 적용하지 않아도 간단한 형태의 분석이 가능하였다.

그럼에도 불구하고 본 논문에서는 이러한 이론적 모델에 기초하여 엄밀한 시스템 다이내믹스 접근법을 통해 과거의 분석결과들과 일관되면서도 더 많은 사실을 발견할 수 있었으며, 아울러 다양한 생태경제적 환경변화에 따른 변화까지를 분석할 수 있었다.

구체적으로 본 논문에서는 생물경제·생물수학적 이론모델의 리뷰를 통해, 공식행태(cannibalistic behavior)와 지천환경의 서식밀도 제약, 방류활동 등 금강 지천의 참게 생태경제 시스템의 주요 특징들을 포괄하는 모델링을 제시하였고, 주어진 제한된 정보로부터 시

시스템의 동적 균형상태로부터 얻어진 정보들을 통해 시스템의 주요 정보(파라미터 및 동적 균형개체수) 들을 파악할 수 있었다.

또한 이러한 정보들을 통해 금강 지천의 참게 방류사업과 그에 따른 생태경제적 영향들을 측정하기 위한 시뮬레이션 모델을 도출하였고 다양한 실험을 수행하면서 종합적으로 금강의 참게 목장화 사업에 대한 생태경제적 파급효과를 종합적으로 측정할 수 있었다. 우선 경제성 분석에서는 연간 8.25억의 비용으로 7.1억의 순이익을 남길 수 있는 B/C 1.86의 경제성 높은 사업이라는 점을 밝혔으며, 아울러 시장이자율 4%를 감안한 본 사업의 영구적 시행에 따른 지역 자산증대 효과를 대략 3~400억 수준으로 제시하였다.

이러한 영구적 사업수행이라는 전제는 금강의 하구둑에 어도(fishway)가 개설되는 경우의 그 경제적 효과의 측정과도 일맥상통하는데, 어도개설의 경제적 효과는 현재 방류량의 50%만 금강 지천에서 자연번식으로 대체하는 경우에도 대략 100억 원의 효과를 보이는 것으로 나타났다. 아울러 기후변화에 따른 수온상승으로 야기된 서식환경의 불안정성이 본 사업에 미치는 리스크 역시 실험을 통해 추정되었다. 만약 수온상승으로 현재 수준보다 2배 정도 공식물이 증가하는 경우에는 대략 2억 원의 연간 순이익의 손실이 발생하는 것으로 예측되었다.

이상과 같은 분석은 생태계의 동적 균형상태를 가정하여 도출된 시스템적인 다양한 특성과 정보 하에 유도된 결론이며, 이러한 접근법은 실제로 금강 유역의 지역개발에 대한 정책적 제언이라는 본래의 목적 외에, 비교적 복잡한 사회과학적 분석이 흔한 한국 시스템다이내믹스 분석에서 흔히 발견할 수 없는 동적 균형상태에 대한 중요성을 역설하는 사례였다는 데에 이론적이며 실제적인 의의를 가지고 있다고 할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구 역시, 제한된 정보 하에서 추진되었으므로 경제성 평가 시 고려되어야 하는 다양한 편익과 비용에 대한 정보는 물론, 공식행태나 어도설치에 대한 보다 구체적인 정보 등의 제약으로 분석결과 및 시사점에 대해 제한적일 수밖에 없었다. 본 연구는 정량적 시스템다이내믹스 분석의 전형적인 예로서, 추후 이러한 보다 구체화된 정보를 통해 분석의 정교함을 추구해야 할 것이다.

【참고문헌】

- 김명환 · 박재민 · 박준기 · 서대석 · 허주옥, (2000). 『주요 채소 · 과일의 수급함수 추정』. 한국농촌경제연구원.
- 신현옥 · 김현우, (2007). 『금강 목장화 사업 추진방안 연구용역 보고서』. 충남도청 · 부경대학교 수산과학연구소.
- 정희성 · 전대욱, (2005). 『생태계 복원사업의 생태 · 경제 통합체계 동태모형 분석-한국 주요 하천의 참게 복원사업을 중심으로』. 『국토계획』, 제40권 제7호: 165-184.
- 정희성 · 전대욱, (2006). 생태계 복원사업의 생태경제 통합체계 동태분석(2)-임진강 참게 복원사업의 확장모형. 『한국시스템다이내믹스연구』 7(2): 97-120.
- Armstrong, C., U. Sumaila, (2000). Cannibalism and the optimal sharing of the North-east Atlantic cod stock: a bioeconomic model. *Journal of Bioeconomics*. 2: 99-115.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review* 12: 183-210.
- Deaton, M., J. Winebrake, (2000). *Dynamic Modeling of Environmental Systems*. New York: Springer Science & Business Media.
- Ford, A. (1999). *Modeling the Environment : An Introduction to System Dynamics Modeling of Environmental System*. Washinton, DC: Island Press.
- Hanson, F., D. Ryan, (1998). Optimal harvesting with both population and price dynamics. *Mathematical Biosciences*. 148: 129-146
- Jing, W., W. Ke, (2004). The optimal harvesting problems of a stage-structured population. *Applied Mathematics and Computation*. 148: 235-247.
- Moxnes, E., (2005). Policy sensitivity analysis: simple versus complex fishery models. *System Dynamics Review*. 21(2): 123-145.
- Murray, J., (1989). *Mathematical Biology*. Springer-Verlag, New York.
- Pearce, D., R. Turner, (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*. Maryland: Johns Hopkins University Press.
- Schaefer, M. B., (1957). A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean. *Bulletin of the Inter-American Tropical Tuna Commission*, 2(6): 245-285.
- Schaefer, M. B., (1954). Some aspects of the dynamics of populations important to the management

of the commercial marine fisheries. *Bulletin of the Inter-American Tropical Tuna Commission*, 1(2): 27–56.

Wacker, H., (1999). Optimal harvesting of mutualistic ecological systems. *Resource and Energy Economics*, 21: 89–102.

Zaghrout, A. and Attalah, S., (1996). Analysis of a model of stage-structured population dynamics growth with state dependent time delay. *Applied Mathematics and Computation*, 77: 185–194.

【부 록】

1. Ⅲ장 3절의 파라미터 추정의 주요 정보들에 대한 민감도 분석

Ⅲ장 3절에서 제시한 정보 1)부터 정보 3)까지는 시스템의 동적 균형상태(steady-state)를 가정한 시스템의 주요 파라미터 추정에 있어서 매우 핵심적인 정보이다. 따라서 본 부록에서는 정보 1)부터 정보 3)까지의 민감도 분석의 결과를 첨부한다. 각 경우의 변화는 알려진 현재 수준보다 +50% ~ -50%를 증가시켜 5회 실시하였다.

우선 <부록 표-1>에는 정보 1)의 변화에 대한 시스템의 민감도가 제시되어 있다. Ⅲ장 3절의 식 13)부터 식 16)까지에서 나타난 바와 같이, 정보 1)인 성게소멸률 d_2 의 변화는 성게의 균형개체수 \bar{P}_2 및 치게소멸률 d_1 , 공식률 e 등을 변화시키나, 치게의 균형개체수 \bar{P}_1 에는 변화를 야기시키지 않는다. <부록 표-1>에서는 파라미터와 균형개체수의 급격한 변화에도 불구하고 가격 및 자산가치에는 거의 변화가 없는 것을 관찰할 수 있다. Ⅲ장 3절의 추정 2)에서 밝힌 바와 같이, 성게의 균형개체수 \bar{P}_2 는 성게의 소멸률 d_2 에 반비례하므로 소멸률의 변화가 균형개체수의 변화를 야기시키지만, 소멸률과 균형개체수의 곱으로 이루어진 수확량에는 근본적으로 변화가 없으므로 경제성 평가의 결과가 달라지지 않는다.

한편 정보 2)인 성게의 수확가능총량 770.6천 마리에 대한 민감도 분석의 결과는 <부록 표-2>에 제시된 바와 같다. 이 경우 마찬가지로 치게 균형개체수의 변화는 없지만, 성게의 수확가능총량은 성게의 균형개체수와 직결되므로 파라미터 및 성게의 개체수에 변화를 야

<부록 표-1> 정보 1(성게소멸률 d_2)의 변화에 대한 시스템 민감도

성게소멸률 d_2 의 변화	150%	125%	100% (Baserun)	75%	50%
치게소멸률 d_1	0.37	0.39	0.43	0.52	0.93
공식률 e	9.89×10^{-4}	7.93×10^{-4}	5.91×10^{-4}	3.70×10^{-4}	0.35×10^{-4}
성게 균형개체수 \bar{P}_2	642.2	770.6	963.3	1,284.3	1,926.5
균형가격(원/마리)	1991.41	1991.42	1991.43	1991.44	1991.45
연간 목장화사업손익 (천 원)	708,684	708,691	708,699	708,707	708,711
영구진행시 자산가치(백만 원)	37,525	37,455	37,373	37,287	37,270

〈부록 표-2〉 정보 2(성계 균형수확량 770.6 천 마리)의 변화에 대한 민감도

성계 균형수확량 770.6의 변화	150%	125%	100% (Baserun)	75%	50%
치계소멸률 d_1	0.88	0.62	0.43	0.28	0.17
공식률 e	0.81×10^{-4}	3.14×10^{-4}	5.91×10^{-4}	9.90×10^{-4}	17.2×10^{-4}
성계 균형개체수 \bar{P}_2	1,444.9	1,204.1	963.3	722.4	481.6
균형가격(원/마리)	1,777.24	1,881.30	1,991.43	2,107.99	2,231.34
연간 목장회사업손익 (천 원)	1,228,409	986,262	708,699	392,412	33,833
연구진행시 자산가치(백만 원)	50,172	44,201	37,373	29,622	20,870

기시킨다. 〈부록 표-1〉의 결과에서는 성계의 소멸률이 증가해도 개체수 변화를 통해 총 수확량에는 변화가 없으므로 경제성 분석결과도 변화가 없었지만, 〈부록 표-2〉의 결과는 소멸률이 고정된 상태에서 성계의 개체수 변화는 수확량의 변화를 야기시키므로 경제성의 분석결과도 민감하게 반응한다. 치계의 개체수가 +50% ~ -50%의 증감을 보일 때, 가격은 약 -10% ~ +12%의 변화를 보이며 자산가치는 +34% ~ -44%의 변화가 관찰된다.

한편 〈부록 표-3〉에서는 치계의 균형개체수가 변화하는 경우를 보이고 있는데, 이 경우 성계의 개체수가 변화하지는 않으므로 수확량과 경제성 평가의 결과 또한 변하지 않는다. 단 〈부록 표-3〉의 공식률의 경우에는 점차로 증가하다가 갑자기 하락하는 결과를 보이는데, 그 이유는 III장 3절의 식 15) 및 식 16)에 나타난 공식률이, 변화하는 치계의 균형개체

〈부록 표-3〉 정보 3(치계 균형개체수 2753.0천 마리)의 변화에 대한 민감도

성계 균형수확량 770.6의 변화	150%	125%	100% (Baserun)	75%	50%
치계소멸률 d_1	0.24	0.31	0.43	0.70	1.86
공식률 e	4.39×10^{-4}	5.08×10^{-4}	5.91×10^{-4}	6.58×10^{-4}	1.40×10^{-4}
치계 균형개체수 \bar{P}_1	4,129.5	3,441.3	2,753.0	2,064.8	1,376.5
성계 균형개체수 \bar{P}_2	963.3	963.3	963.3	963.3	963.3
균형가격(원/마리)	1,991.49	1,991.47	1,991.43	1,991.38	1,991.25
연구진행시 자산가치(백만 원)	36,755	37,051	37,373	37,736	38,181

수 P_1 에 대해서 유리함수의 형태를 보이고 있으므로 비선형으로 변화한 결과로서 시스템의 행태에 미치는 의미 — 균형 개체수의 비선형적 변화 — 는 없다.

이상과 같은 민감도 분석을 통해, 성계의 소멸률이나 치계의 균형개체수와 같은 우리의 관심사와 비교적 먼 변수는 시스템에 덜 민감하고 반대로 성계의 균형수확량과 같이 우리의 관심사에 밀접하고 비교적 더 잘 알려진 정보는 시스템에 민감하다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 우연히 발견된 것이 아니고, 본 논문의 동적 균형조건을 활용한 추정방법을 통해서 그렇게 되도록 구조화된 것이다. 즉 본 논문은 주어진 정보 중 근거가 비교적 확실한 정보를 중심으로 이러한 값들이 시뮬레이트될 수 있도록 불확실한 정보를 추정하는 방법을 제시하고 있다. 따라서 불확실한 정보들은 값이 변화한다고 해도 전체적으로 시스템의 비교적 확실한 정보들의 알려진 값을 시뮬레이트하도록 되어 있으며, 그 핵심은 동적 균형조건 — 가장 본질적인 시스템의 상태 — 임을 역설하고 있다.

즉 본 논문은 알려진 정보의 수준이 실제로 시스템에서 구현될 수 있도록 이론적인 균형상태의 조건들을 활용하여 불확실한 정보를 추정하는 방법에 관한 것이며, 그 결과로서 알려지고 관심 있는 정보를 정확히 시뮬레이트함으로써 모델의 정량적 엄밀성 — 예측적 타당성 — 을 제고시키는 방법을 제시하고 있다. 본 논문에서, 성계의 균형수확량(최대수확가능량)이 가장 확실한 정보였으며, 치계의 균형개체수나 공식률 등이 가장 불확실한 정보였다. 즉, 물 밖의 인간활동과 연관된 정보들이 확실하다고 볼 수 있으며 물속의 생태적 상황에 대한 정보는 상대적으로 불확실하였다. 그러나 비교적 불확실한 정보들(물속 생태계의 파라미터들)의 추정에 있어서 과학적으로 알려진 사실 및 동적 균형조건을 활용하여 확실한 정보들이 시뮬레이트되도록 추정하였으므로 불확실한 정보 — 그만큼 우리의 관심사에서 먼 정보 — 들은 시스템의 전체적인 구조와 행태에서 큰 의미를 갖지 않게 된다. 본 부록의 민감도 분석은 이상과 같은 본 논문의 의의를 뒷받침하고 있다.