

# 우리나라 제비 생태계의 변화에 대한 동태성 분석 : 왜 제비는 20년 사이 100분의 1로 줄어들었는가?

## Analysis of the Ecology Dynamics of the House Swallow

고장규\* · 한준수\* · 박영선\* · 최남희\*\*

Ko, Jang Kyu\* · Han, Jun Soo\* · Park, Young Seon\* · Choi, Nam Hee\*\*

### Abstract

The ecology of house swallow is closely related to the humans life because their life depend on the human settlements conditions and environments. 30 years ago house swallows are very common at the country side, but recently they are very rare. Almost the number of house swallows decrease as 1 of hundredth during 20 years. Why this dramatic population decrease are happening in the ecology of house swallow? The Population size impacted by many factors such as nesting, breeding, feeding, returning. The objective of this paper is to analyse the population dynamics of the ecology of House Swallow. This paper focuses on the important ecological changes—nests, foods, and return rates from wintering area—associated with recent country side development. In this paper, we explore the feedback loops of population dynamics and simulate the policy scenario model.

**Keywords:** 제비, 생태계, 도시화, 농경지, 제비집, 귀소율

(House swallow, ecology, urbanization, farmlands, a swallow's Nest, return rate)

\* 충주대학교 행정정보학과 학사과정 (공동저자, kensin03@nate.com)

\*\* 충주대학교 행정정보학과 교수 (교신저자, drnhchoi@cjnu.ac.kr)

## I. 서론

우리나라에서는 30~40년 전만 해도 집집마다 한 개 이상의 제비집이 있을 만큼 사람 수보다 제비의 수가 더 많았다. 그러나 1980년대를 전후로 농촌지역에서의 산업화가 본격적으로 진행되어 가면서 농경지의 개발과 도시화로 인해 제비들은 갈 곳을 잃고 번식지인 우리나라에서 모습을 감추기 시작했다.

도시화로 인한 환경변화는 직접적으로 제비의 서식지에 영향을 주었고 제비는 점점 그 수가 줄어들어 급기야 보호야생 조류로 지정되는 지경에까지 이르렀다. 제비 서식지 환경 변화는 단순히 제비의 수가 감소하고 있다는 사실 보다 더 큰 문제를 시사하고 있다. 제비에게 적합하지 않은 환경이 과연 인간에게는 적합한 환경일 것이냐 하는 것이다.

논과 같은 경작지는 우리나라의 주식인 쌀의 생산 공간이기도 하지만 제비에게 있어서는 중요한 서식지이기도 하다. 그러나 논 환경파괴로 제비가 멸종해가고 있는데 과연 사람은 멸종한 것일까? 제비가 생물학적 존재라면 사람도 생물학적 존재다. 몸무게가 가벼운 제비는 좀 일찍 독성(毒性)이 나타난 것이고 체중이 더 나가는 사람은 아직 심각한 증상이 나타나지 않았을 뿐이다. 제비가 서식할 수 없는 지금의 서식지 환경을 이대로 방치하면 결국 그곳은 인간도 살수 없는 환경이 되고 말 것이다.

서식지 환경 변화에 따른 제비의 감소는 단순히 제비의 멸종을 막아야 한다는 문제뿐만 아니라 자칫 인간의 생명을 위협할 수 있는 치명적인 위기가 될 수 있다. 결국 제비의 생태 환경 변화는 인간의 생태 환경을 평가하는 하나의 지표가 된다고 할 것이다(조선일보, 2005년 9월 6일자).

제비가 줄어드는 서식지 환경변화의 이유로는 우선 도시화로 인한 주택개량을 들 수 있다. 제비는 논에서 진흙과 짚을 물어다 사람이 사는 집 처마에 집을 짓는다. 제비가 사람이 사는 민가에 집을 짓는 이유는 그렇게 해서 제비의 알과 새끼를 노리는 뱀이나 쥐 등 천적의 접근을 막아 새끼를 보호하고자 하기 때문이다. 하지만 농촌지역의 주거환경 개발로 인해 대부분의 재래식 주택은 진흙이 잘 달라붙지 않는 시멘트나 콘크리트 벽면으로 주택개량이 이루어져 제비가 처마 밑에 집을 짓기 어렵게 되었다.<sup>1)</sup>

또한, 도시화로 인한 농지면적의 감소와 농약의 사용량 증가로 제비의 먹이가 많이 줄었다는 점을 들 수 있다. 제비는 알에서 부화한 새끼제비를 20여 일 키워 둥지를 떠나게 하는데 이때까지 새끼제비들은 엄청난 양의 먹이를 필요로 한다. 약 3주 내에 몸무게를 10 배 이상 늘려야 하기 때문이다. 다 성장한 제비의 경우에도 가을이 되면 월동지인 동남아,

1) EBS, 〈하나뿐인 지구〉 제비 돌아오다, 2009년 5월 14일 방영.

뉴기니, 호주, 서남 태평양제도 등 먼 거리를 이동하기 위한 체력을 비축하기 위해 많은 양의 먹이를 필요로 한다. 하지만 제비들의 먹이 공급처였던 농경지 환경이 도시화로 인한 농지면적의 감소나 논과 농경지에 뿌려진 농약과 화학비료로 인해 바뀌어 버렸다. 논과 농경지에 뿌려진 농약과 화학비료의 사용량이 많아지면서 제비의 먹이인 벌레들의 수가 급격하게 감소하였다.

더군다나 농약에 오염된 벌레를 먹게 되면 제비도 나쁜 영향을 입을 수밖에 없다. ‘환경 호르몬’으로 불리는 내분비교란물질의 섭취로 알을 제대로 낳지 못하거나 부화된 새끼제비들도 건강하게 자라지 못하는 문제가 나타나게 된다.

특히, 농촌지역의 개발로 인한 제비 생태계의 변화는 제비들이 번식지에서 겪은 좋지 못한 경험으로 학습되어 월동지로 이동한 제비들이 다음 산란기 때 다시 번식지인 한국으로 돌아오는 제비들의 귀소율에 영향을 주어 제비의 개체 수 감소에 결정적 원인이 된다는 사실이 확인 되었다(조선일보, 2009년 5월 9일자).

이 논문은 제비의 개체 수 감소에 영향을 주는 변수들을 시스템 사고를 바탕으로 한 시스템다이나믹스 모델링을 통해 농촌지역의 개발이 제비 서식지의 생태환경 환경에 얼마만큼의 영향을 주었으며, 그 결과 어떻게 제비의 수가 20여 년 동안 100분의 1로 줄어들게 되었는가를 살펴보고자 하였다. 또한, 정책모의 실험으로써 제비의 생태환경을 개선하기 위한 정책 변수를 추가하였을 때 발생하는 제비 개체 수 변화를 살펴보고자 하였다.

## II. 제비의 생물학적 특성과 우리나라의 제비 생태계 변화

### 1. 제비의 생물학적 특성

제비의 몸길이는 약 18cm이다. 몸의 윗면은 푸른빛이 도는 검정색이고 이마와 목의 앞쪽은 어두운 붉은 갈색, 나머지 아랫면은 크림색을 띤 흰색이다. 꼬리 깃에는 흰색 얼룩무늬가 있다. 어린 새는 긴 꼬리 깃이 다 자란 새보다 짧으며 전체적으로 색이 희미하다. 한국에서는 흔한 여름새였지만 한국의 서식지 환경변화에 따라서 그 개체 수는 점점 줄어들고 있다. 이동할 때나 번식기에는 단독 또는 암수가 함께 살다가 번식이 끝나면 가족과 함께 무리를 짓는다. 번식이 끝난 6월부터 10월 상순까지 평지 갈대밭에 잠자리를 마련하고 웨가 질 무렵 수천 마리에서 수만 마리씩 떼를 지어 모여든다.<sup>2)</sup>

제비는 보통 일반 주택이나 교량의 틈새에 둥지를 트는데, 보통 한 집에 1개의 둥지를

2) 두산백과사전 <http://www.encyber.com>

짓고 매년 같은 둥지를 고쳐서 사용한다. 암수가 공동으로 집을 짓는데, 논두렁에 있는 풀과 흙을 물어 날라 집 한 채를 짓기 위해 걸리는 시간은 4-5일이다. 하루 평균 300회 총 1400회 이상을 비행해야 집 한 채를 지을 수 있다.

제비는 1일에 한개 씩 산란하며, 둥지 당 산란 수는 1차 번식에서는  $4.75 \pm 0.5$ 개, 2차 번식에서는  $4.1 \pm 0.3$ 개로 나타나 1차 번식의 산란수가 유의적으로 많다. 포란은 암컷만 하며, 수컷은 다른 수컷이나 천적의 침입을 경계하는 역할을 한다. 포란은 13-14일 동안을 하며, 부하수는 10개의 둥지에서 둥지 당 부하수가 보통 3-4개이다. 부화율은 1차 번식에서 82.98%, 2차 번식에서 70.73% 정도이다. 부화에 성공한 새끼들 중 이소 전가지 살아남은 개체는 1차가 30개체(76.92%), 2차는 19개체(65.52%)이다. 제비는 하루에 평균 280~420마리의 먹이를 새끼에 전달하고 일년 간 잡아먹은 곤충의 수는 42,000-63,000마리에 이른다(김인규 외, 2001; 한현진, 2009).

## 2. 우리나라의 제비 생태계 변화

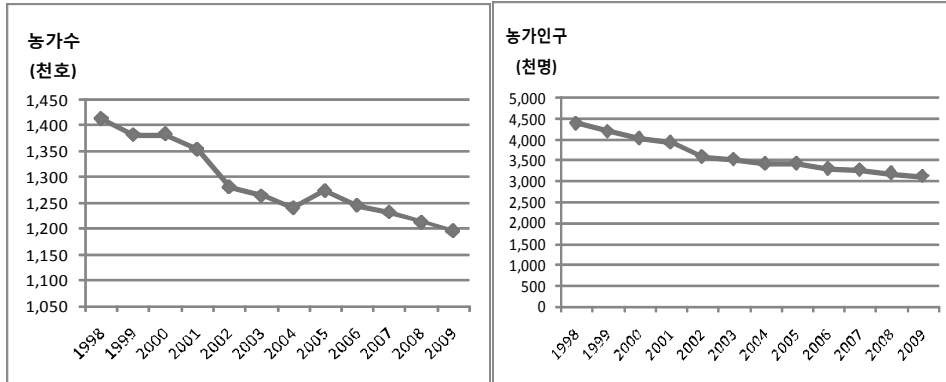
생태계란 특정 지역의 생물과 그것을 둘러싼 물리적 환경을 종합하여 통일체로서 파악한 개념이라 정의 된다. 이 논문에서는 제비의 개체수가 1/100로 줄어든 원인을 생태계를 둘러싼 많은 변수 가운데에서 사회 발전에 따른 도시화와 농경지환경 변화를 주된 변수로 보고 그것을 중점으로 살펴보았다.

### 1) 도시화에 따른 제비의 생태계 변화

제비의 주된 서식지는 도심근교의 인가나 농가이며 둥지는 처마 밑이나 교량 등에 흙과 벗짚을 이용하여 짓거나 묶은 둥지를 보수하여 사용한다. 제비집과 관련이 있는 변수로 농가와 농가 인구의 추이는 다음 그래프에서 보는 바와 같다.<sup>3)</sup>

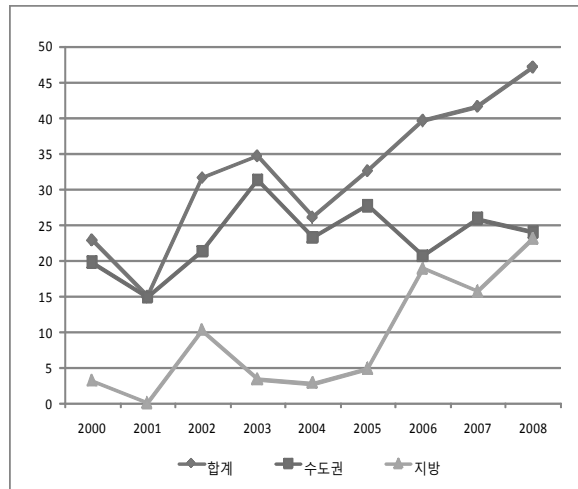
---

3) e나라지표 (<http://www.index.go.kr>) 농가와 농가인구 지표 개념 : 농가는 경지 10a이상 직접경작하거나 연간 농축산물 판매 금액이 50만원 이상으로 농업을 계속하는 가구를 말한다. 농가인구수는 농가에서 생계를 같이 하는 가족 및 친인척을 의미하고 혈연관계가 없는 사람도 농업과 관련되면 가구원으로 포함



[그림 1] 농가수 및 농가인구 추이

제비의 서식지인 농가수는 매년 1.4%씩 감소하고 있으며 농가인구 또한 3.0%씩 줄어들고 있는 추세이다. 이러한 추세는 수도권과 같은 도시지역으로 이주하는 가구가 계속해서 늘어나고 있기 때문에 지속적으로 감소될 것으로 예상 할 수 있다.<sup>4)</sup> 또한 주택재개발 준공 실적 그래프에서도 알 수 있는 바와 같이 앞으로 전통식 주택의 수는 개발로 인해 계속 줄어들 수밖에 없는 상황임을 알 수 있다.<sup>5)</sup>



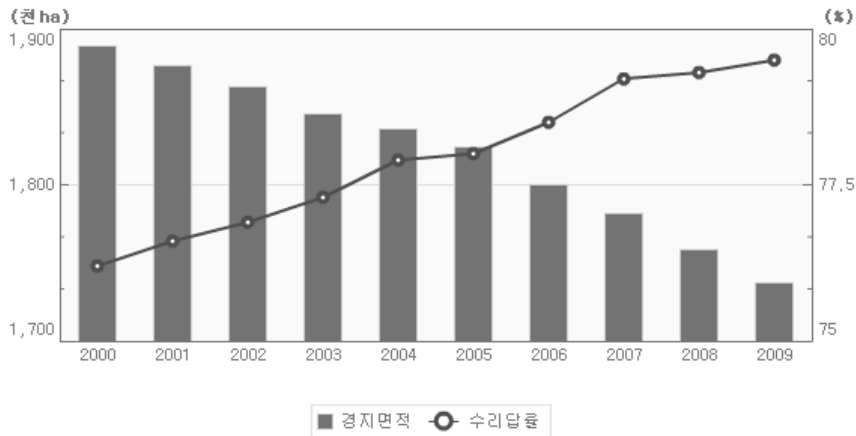
[그림 2] 주택 재개발 년도별 준공실적 추이(천호)

4) e나라지표 (<http://www.index.go.kr>) 수도권 전입 인구수는 04년도 140명, 05년도 129명, 06년도 112명, 07년도 83명, 08년도 52명으로 조사됨

5) e나라지표 (<http://www.index.go.kr>) 의 주택 재개발 준공 실적

## 2) 농경지환경에 따른 제비의 생태계 변화

제비는 하늘을 날아다니면서 곤충을 포식하며 새끼를 키우는 기간에도 곤충의 성충과 유충을 주로 먹는다. 대부분 파리·딱정벌레·매미·날도래·하루살이·벌·잠자리 같은 파리목과 벌목의 곤충을 잡아먹고 모자라는 양은 거미류 등으로 충당한다. 제비는 이러한 곤충을 주로 농경지나 습지 근처에서 사냥을 한다. 아래 그림은 농지면적 추이를 보여주는 그래프로 연평균 13천ha가 감소하고 있으며<sup>6)</sup>, 그에 비해 수리답율은 올라가는 추이를 보이고 있다.<sup>7)</sup>



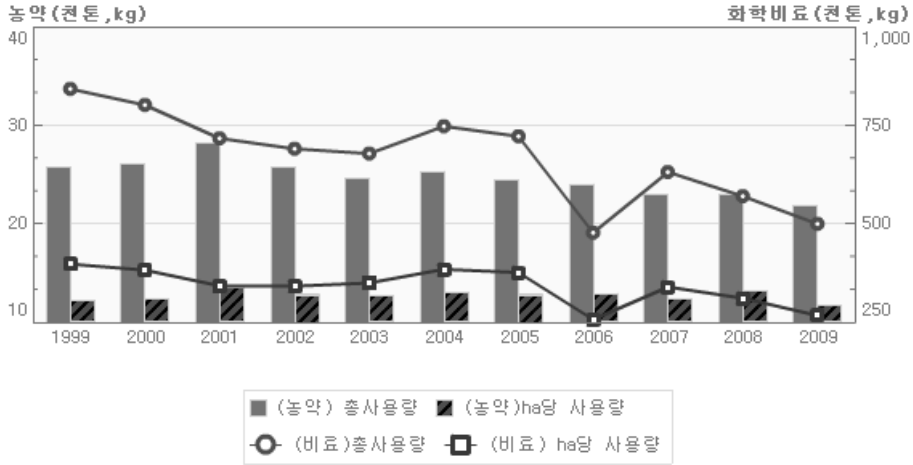
[그림 3] 경지면적 및 수리답율 추이

따라서 농경지 면적의 변화에 따라 제비가 먹이를 구하기 힘들어 졌다는 것을 미루어 짐작 할 수 있다. 또한 농경지 환경의 변화로서 농약의 사용량이 늘어나 벌레를 감소시키고 있다. 다음은 농약 사용량에 추이에 관한 그래프이다.<sup>8)</sup> 농약과 화학비료의 사용량은 약간의 증감 추이를 보이고 있다. 98년부터 지속적으로 감소를 보이지만 다른 나라의 농약 사용량은 네덜란드 8kg, 프랑스 4.5kg, 미국 2.3kg으로 우리나라는 다른 나라에 비해 높은 수준을 보이고 있다. 그러나 저·무 농약농산물 및 유기농산물 수요가 증가하면서 농약사용량은 지속적으로 감소하는 추세를 보이고 있다.

6) e나라지표 (<http://www.index.go.kr>) 경지면적 및 수리답율 추이

7) 전체 논면적에 대한 수리시설에 의한 농업용수 공급 혜택을 받게 되는 면적비율

8) e나라지표 (<http://www.index.go.kr>) 농약 및 화학비료 사용량



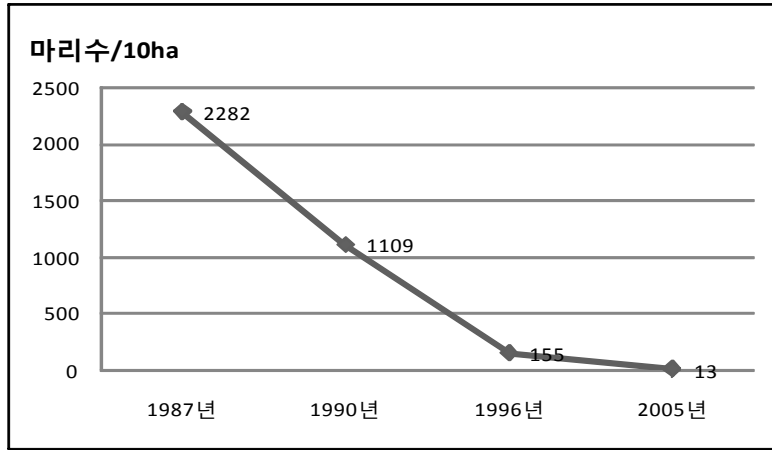
[그림 4] 농약 및 화학비료 사용량 추이

#### 4. 생태계의 변화에 따른 제비 개체 수 감소

지역 사회발전에 따른 생태계의 변화가 나타나면 제비의 개체 수에 영향을 주게 된다. 조사지역과 시기에 따라 다르지만 충북산림환경연구소와 금강유역환경청에서 1980년대부터 실시하고 있는 조사 결과에 따르면 매년 민가(民家)가 있는 충청도 지역의 10ha 면적을 대상으로 조사한 결과 1987년 2,282마리였던 개체수가 1990년엔 1,109마리, 1996년 155마리로 줄었고, 2005년 5월엔 13마리, 8월엔 22마리로 조사된 바 있다(조선일보, 2005년 9월 6일자).

그러나 비교적 최근의 조사인 국립생물자원관의 조사에 따르면 제비의 개체 수는 1000ha기준으로 2000년에는 370마리였던 것이 2008년도에는 212마리로 감소하여 연 평균 6.4%의 감소를 보이고 있다.

이들 두 조사결과를 비교해 보면 80년대부터 조사한 결과들은 20여 년 동안 매우 급격한 개체수의 감소를 보이고 있으나 2000년 이후의 조사들은 이미 감소된 추이가 반영되어 급격한 감소는 나타나지 않는 것으로 판단된다.



[그림 5] 제비의 개체 수 감소 추이

이상의 통계자료에서 살펴본 바와 같이 우리나라 제비 개체수의 급격한 감소는 제비 생태계의 여러 가지 환경변화에 의한 복합적인 작용으로 볼 수 있다. 그 중에서도 제비 개체수의 감소를 초래했을 것으로 추정되는 주된 변화로는 농촌지역사회의 개발에 따른 농경지 감소와 그 밖의 자연환경 훼손, 그리고 처마가 있는 농가주택의 개발에 따른 소멸이 가장 크다고 할 수 있다.

### Ⅲ. 제비의 귀소성에 대한 시스템 사고

#### 1. 제비의 귀소본능과 영향요인

제비는 평균 3월에 돌아오며, 6개월간 한국에서 산란 및 서식을 하고 9월에 월동지로 이동을 한다. 이러한 행위가 주기적으로 반복이 되고 있으나, 제비가 귀소하는 숫자는 점점 줄어들고 있다. 그 이유는 제비의 학습으로 인한 결과인 것으로 알려지고 있다(김인규, 2000).

귀소본능(歸巢本能, homing instinct)이란 동물이 자신의 서식 장소나 산란·육아 등을 하던 곳에서 멀리 떨어져 있을 경우, 다시 그 곳으로 되돌아오는 성질을 말한다. 귀소성(歸巢性) 또는 회귀성(回歸性)이라고도 한다. 귀소성질을 가지고 있는 동물의 예로 들 수 있는 비둘기는 집을 중심으로 귀소를 학습시키고 점차 그 반지름을 넓혀나가면 매우 먼 곳에서도 되돌아오는데 이것은 학습과 귀소성이 함께 작용한 것이다.



철새는 번식하는 토지와 겨울을 지내는 토지를 왕복한다. 예를 들면, 어떤 지역에서 둥우리를 만들어 번식한 제비는 가을에는 수천km나 날아서 남방의 일정 지역으로 가서 겨울을 지내고 다음해 봄에 거의 같은 장소로 되돌아온다. 그들은 이동방향을 본능으로 알고 있다. 그리고 그 방위를 태양의 위치를 기준으로 정할 수 있다. 태양의 위치가 변해도 새는 스스로의 체내시계에 의하여 시각을 알고, 또 시각에 의해 태양의 천공상의 움직임을 읽을 수 있다.

제비의 귀소에 영향을 미치는 요인으로서 벌레(먹이)는 제비가 귀소 하여 산란을 하고 떠날 갈 때까지 꼭 필요한 요소이다. 벌레가 서식하는 농경지환경은 바뀌고 있으며 농경지 환경 변화의 대표적인 예로 농약 사용을 들을 수 있다. 벌레의 감소는 새끼제비가 제대로 성장하지 못하는데 영향을 미치거나 제비의 산란에 나쁜 영향을 미친다. 제비가 주로 둥지를 트는 처마는, 제비가 포식자로부터 새끼제비를 보호하기 위해 사용하는 장소이다. 따라서 사람이 살지 않은 처마에는 보금자리를 지으려 하지 않는다. 하지만 농가수의 감소 현상은 계속 일어날 것으로 전망이다. 이로 인해 제비는 사람이 살고 있는 도시로 나와 제비 집을 지으려 하거나, 그렇지 못한 경우 산란을 하지 않는다.

제비는 먹이와 보금자리에 대한 지속적인 변화를 겪으며 학습을 하고 그 학습율에 따라 우리나라로 다시 되돌아오는 확률인 귀소율이 감소하고 있다. 결국 제비의 생태계와 서식지의 변화가 제비의 개체 수 감소에 가장 큰 영향 요인이 되고 있는 것이다.

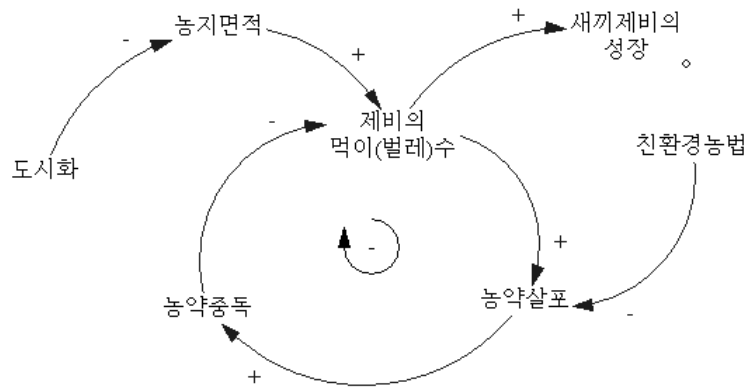
귀소율에 대한 연구결과들에 따르면 원병오(1969)의 연구에서는 5.66%, 김인규(2000)의 연구에서는 27.8%, 정다미 외의 연구(2008)에서는 60%, 그리고 일본 조류학자의 연구에서는 47.1%로 알려져 있으나(조선일보, 2009년 5월 9일자) 실험조건과 상황에 따라서 각각 다르다게 나타난다. 귀소율에 대한 연구에서 공통적인 사실은 성체제비의 귀소율이 어린제비보다 크게 높다는 것이다.

## 2. 제비의 서식지 환경 변화에 대한 시스템 사고

여기에서는 앞에서 제기되었던 제비의 개체 수 감소와 귀소율 감소에 대한 동태적 피드백사고, 사실적 특성과 제비의 생태 및 서식지 변화에 영향을 주는 요인들을 결합하여 제비의 감소의 원인에 대한 기본적인 피드백 구조를 인과지도로 나타내었다. 이렇게 제비의 감소에 대한 내부적인 시스템 문제를 동태성의 피드백 기본구조를 규명하는 것은 제비의 개체수 감소를 이해하는 기본방향을 도출하는 틀이 될 뿐만 아니라 제비의 감소율을 줄이기 위한 정책을 파악하는데 도움을 준다.

[그림 6]은 도시화에 따른 제비 먹이 감소의 피드백 구조를 포함하는 인과지도를 나타낸

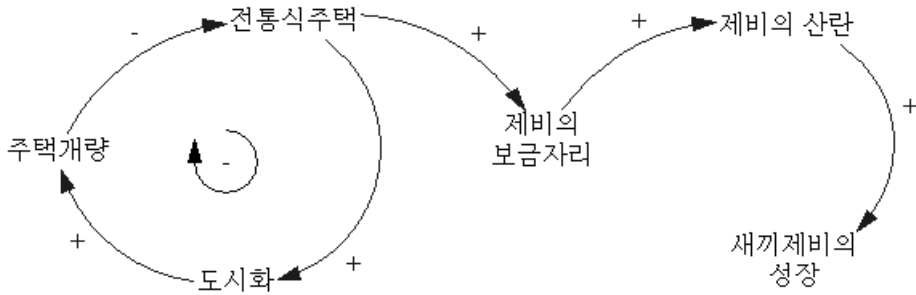
것이다. 이 인과지도는 농촌의 도시화가 진행됨으로써 농지면적의 감소가 초래되었고, 농경지환경 변화의 영향으로 인하여 농약의 살포가 늘어남으로써 농지면적의 감소와 농경지환경이 함께 상호작용 하여 결국 농경지에 서식하는 유동적인 벌레의 수가 지속적으로 줄어드는 인과 순환적 피드백 구조를 보여주고 있다.



[그림 6] 도시화에 따른 제비의 먹이 감소 인과지도

서론에서 언급했던 것처럼 우리나라는 1980년대를 기준으로 급속한 산업화의 진행으로 농경지를 개발하여 도시로 개척하였고 농업에서 제조업과 서비스업으로 변화하는 과정에서 농경지는 서서히 그 면적과 규모가 줄어들어 제비의 먹이인 벌레가 감소하였다. 벌레가 줄어들면 농약사용량도 줄어들어야 하나 벌레 먹은 야채, 채소, 과일보다는 깨끗한 농산물을 선호함으로써 농경지환경은 점점 농약 살포율이 상승하였다.

벌레를 감소시키는 강한 독성의 농약을 사용함으로써 벌레의 개체 수는 감소하였고 농약의 독성에 내성을 가진 벌레만 살아남아 제비의 먹이가 됨으로써 제비의 산란과 번식을 방해하는 영향을 주게 되었다. 따라서 이 피드백 루프는 제비의 개체수가 점점 감소하는데 영향을 미치는 피드백 구조라고 할 수 있다.



[그림 7] 도시화에 따른 제비의 서식지 감소 인과지도

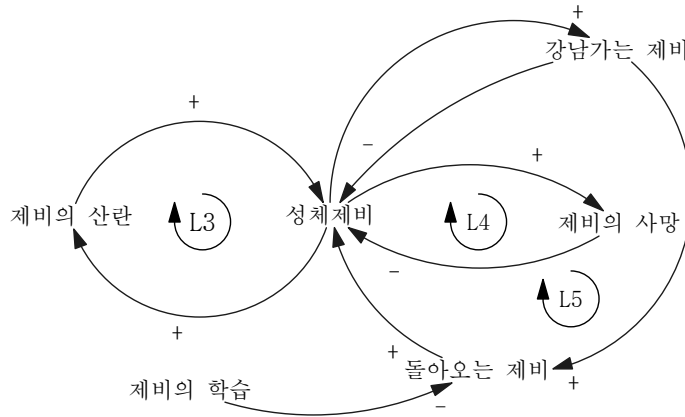
[그림 7] 도시화란 도시의 발전과 그 발전에 따른 주변의 취락 내지는 지역의 변화과정을 말하는 것이다. 도시 발전과 도시화는 별개의 개념으로 파악되기 쉬우나, 도시화는 도시 세력이 외연적으로 과급되어 주변의 농촌지역이 도시적 취락으로 변화되어가는 과정과 도시 자체가 보다 도시적인 요소를 더해가는 과정이다.

농촌지역의 시가지 내부가 주택지역, 공업지역, 상업지역등으로 분화하는 현상이 나타나게 되었는데, 일반 농촌지역에서도 국민경제면에서 2,3차 산업의 비중이 높아짐으로써, 고용적인 측면이나 토지 이용적인 측면에서 도시화가 진행되었다. 도시화는 농촌적 생활양식에서 도시적 생활양식으로 이행함으로써 생겨나는 질적 변화의 모든 과정을 의미한다. 그러나 변천과정 중 농촌적 생활양식의 재래식 주택들이 줄어들어 제비들의 보금자리도 그 비율만큼 줄어들고 있다.

처마 밑에서 둥지를 짓고 인간의 보살핌을 받으며 살아온 제비의 특성만큼 처마가 없어지고 둥지를 지을 수 없게 되는 환경의 변화에 따라 제비보금자리는 농촌지역이 도시화로 변하는 만큼 줄어들고 있다.

### 3. 제비의 귀소본능에 대한 시스템 사고

인구나 자본 같은 수준변수 들은 스스로 증식되는 성향을 갖고 있다. 제비의 번식률은 성체제비의 수에 비례한다. 성체제비와 제비의 출생은 양의 피드백 구조를 가진다. 제비의 사망이라는 변수가 없다면 제비의 수는 자기 증식률에 의해 꾸준히 증가 할 것이다. 하지만 인구나 자본과 같은 수준 변수들은 자동 생성되기도 하지만 자동 소멸되기도 한다. 제비 또한 출생 사망은 동시에 진행되며 제비의 사망률은 성체제비의 수에 비례하여 증가한다. 이러한 과정은 앞의 양의 피드백과는 달리 음의 피드백 루프를 구성한다.



[그림 8] 제비의 번식과 사망 그리고 귀소에 대한 인과지도

제비의 개체 수는 출생과 사망 말고도 월동지(‘강남 가는 제비’)로 떠나는 제비에 의해서도 영향을 받게 된다. 이때 월동지로 떠나는 제비는 우리나라에 있던 제비가 모두 떠나는 것이지만 강남으로 갔던 제비들이 다시 100% 우리나라로 귀소하는 것은 아니다. 이 귀소율은 제비의 학습 정도에 따라 달라질 것이다.

돌아오는 제비의 비율은 앞서 설명했던 제비의 생태계와 서식지 변화로 인해 학습된 제비들이 우리나라로 돌아오지 않고 다른 나라로 이동하면서 귀환하는 제비의 수가 줄어드는 상황을 보여주는 피드백 루프이다. 이 피드백 루프는 양의 피드백 루프로서 우리나라에서 제비들이 월동지로 많이 떠나면 떠날수록 많이 돌아오는 양의 피드백 루프이지만 귀소율이 줄어들게 되면 그 영향으로 돌아오는 제비의 수가 매년 감소되는 상황을 나타내주는 피드백 루프이다.

#### 4. 서식지 및 생태계의 균형에 따른 제비의 귀환

우리나라의 서식지나 생태계의 변화에 따라 먹이의 균형과 제비의 보금자리의 균형은 유동적으로 변화하였고, 제비의 귀소 학습은 그 변화에 따라 비례할 것이다. 생태계의 지속적인 변화에 따라 제비의 귀소는 2000년대를 들어서 점점 감소하는 추세였지만, 시간에 따라 변화하는 우리나라의 서식지 및 생태계의 변화의 유동에 따라서 제비의 개체수도 증가 및 감소하는 결과를 보일 것이다.



받아 농약살포율이 증가함으로써 환경호르몬에 노출되거나 사망하는 벌레가 생겨나고 그에 따른 벌레의 감소로 인해 농약 살포율은 상호작용함으로써 줄어들거나 늘어나겠지만 결국 서식하는 벌레의 수는 시간이 흐름에 따라 서서히 줄어든다는 것을 보여준다.

두 번째 피드백 루프(L2)는 제비들의 서식지 보급자리에 관한 것이다. 제비들은 오랜 세월동안 인간의 보살핌을 받으며 공존해왔다. 처마가 있는 집이라고 하더라도 그 집에 사람이 살지 않으면 제비는 그 주택에서 둥지를 만들지 않는다고 한다. 농촌적 생활양식에서 도시적 생활로 변하면서 주거양식 또한 아파트로 많이 바뀌었다. 아파트에는 처마가 없어 제비들이 둥지를 만들지 못한다. 피드백 루프(L2)는 전통식주택이 도시화 되어 주택개량이 이루어지고 주택개량에 따라 전통식주택이 줄어들게 되면서 결국 제비들은 보급자리를 잃어가게 될 것임을 보여주고 있다.

세 번째 피드백 루프(L3)는 자기증식 성향을 가지고 있다. 성체제비의 수의 비율에 따라 산란하는 제비는 증가하며, 다른 변수가 없다면 제비의 개체 수는 무한히 증가하는 양의 피드백 구조를 갖게 된다. 그러나 네 번째, 피드백 루프(L4)는 자기감소 성향을 가지고 있는 루프이다. 성체제비의 수에 비례하여 제비의 사망이 이루어지지만 성체제비가 감소하는 만큼 사망도 감소하게 되어 제비의 출생이라는 변수로 인해 스스로 균형을 유지하는 음의 피드백 루프를 구성한다.

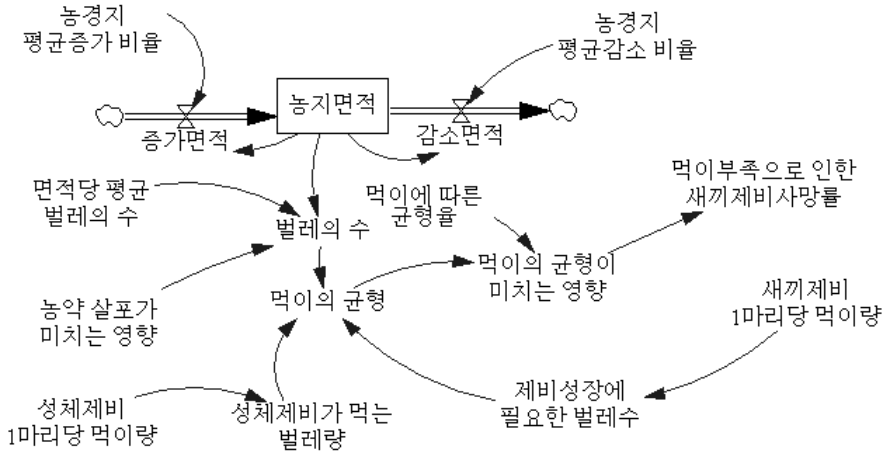
다섯 번째, 피드백 루프(L5)는 보조변수에 의해 영향을 받는 피드백 루프이다. 앞의 자기 증식 루프와 자기 감소 루프에서는 출생과 사망이 변화율 변수로 정의되었으며, 번식률과 생존기간은 다른 변수들에 영향을 받게 된다. 제비의 귀소율은 제비의 학습에 의해서 영향을 받게 되는 함수로 보았다.

## V. 시뮬레이션 모델링 및 분석결과

### 1. 기본 모델

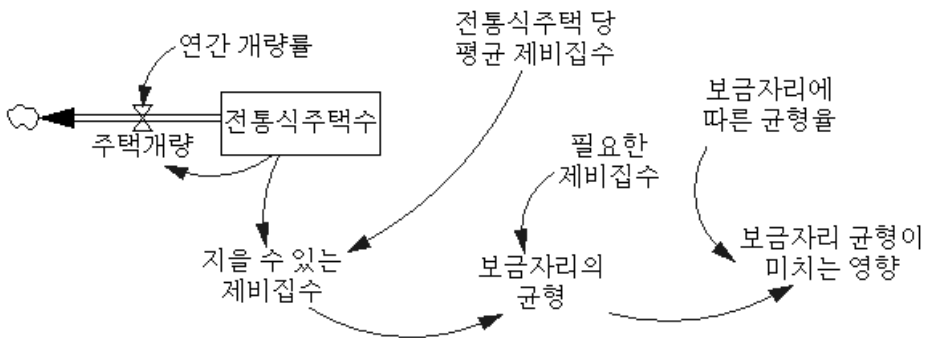
[그림 6]의 인과지도에 기초로 한 시뮬레이션 모델인 [그림 11]은 전통식 주택의 수는 일정한 연간 개량률 0.3을 가지고 점차 감소한다고 설정하였다. 지을 수 있는 제비집수는 전통식 주택당의 평균 제비집 수와 전통식 주택수의 곱으로 계산하였으며, 필요한 제비집수로 나누어서 보급자리의 균형을 도출 하였다. 이러한 도출 결과에 LOOK UP 함수를 사용하여 보급자리의 균형의율이 1 이하의 값을 가질 경우 그대로 적용되며 이상의 값을 가지면 보급자리 균형이 미치는 영향을 없게 하기 위해서 [(0,0)-(100,10)], (0,0), (0.1,0.1), (0.5,0.5), (1,1),

(100,1) 다음과 같은 식을 사용했다.



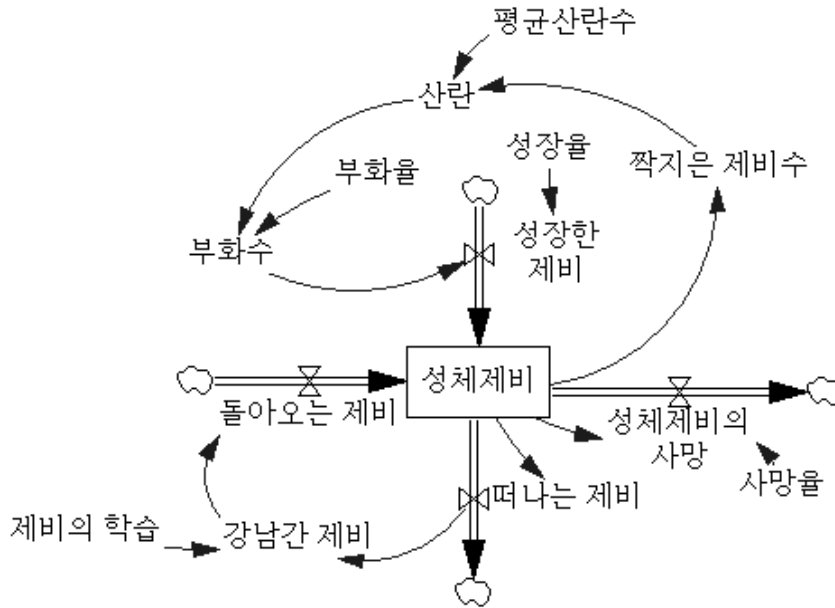
[그림 11] 농지면적의 감소로 인한 먹이의 균형 영향

[그림 7]을 기초로 한 시물레이션모델은 [그림 12]에서 보는 바와 같다. 여기에서 농경지 면적은 농경지 평균감소비율로 매년 감소를 하며, 농경지 평균증가비율은 없는 것으로 설정하였다. 이 결과로 매년 도출된 농지 면적에서 면적당 평균 벌레의 수(8마리)와 농약 살포가 미치는 영향(0.2)의 곱을 통해 총 벌레수를 도출하며, 도출된 값을 제비의 벌레 소모량과 나누어서 균형을 값을 도출하였다. 이러한 도출 결과는 LOOK UP함수를 사용하여 위와 같은 방식 [그림 12]으로 설정했다.



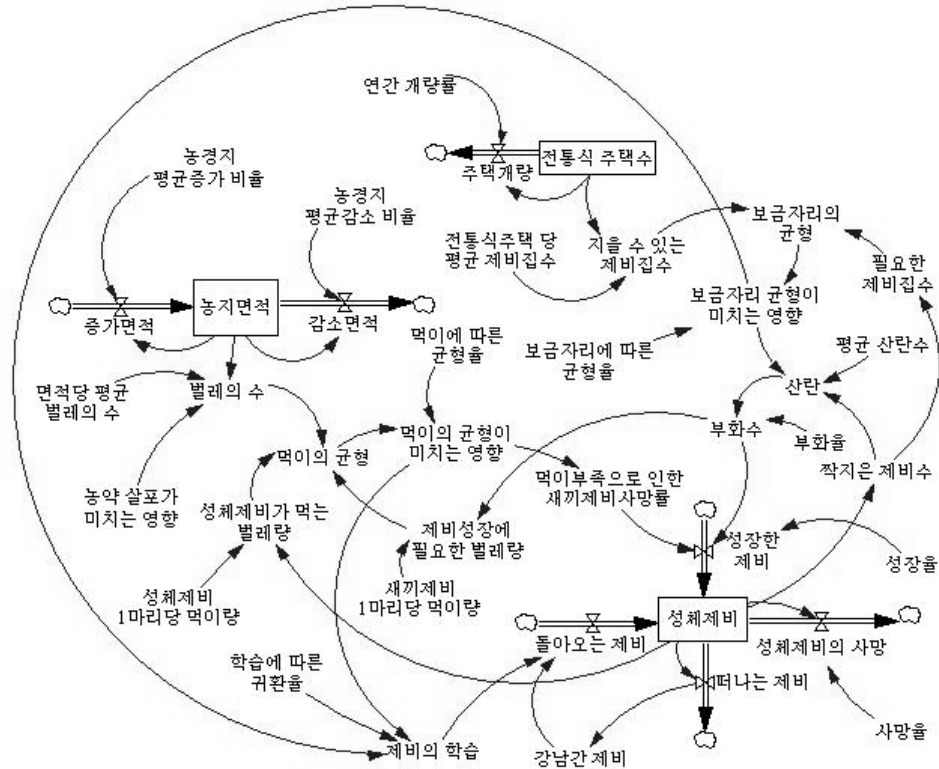
[그림 12] 농촌지역의 도시화에 따른 제비보금자리의 변화

또한 [그림 8]의 인과지도에 기초한 시뮬레이션 모델 [그림 13]은 월동지역에서 돌아오는 제비는 평균 20%의 귀환율을 가지고 돌아온다고 가정하였으며, 돌아와 서식하는 성체 제비는 짝을 찾아 산란을 시작하며 평균 7개의 산란을 하고 이를 통해 나온 제비 알은 일정한 부화율 0.8의 확률을 가지고 태어나서 0.7의 성장률로 성체제비가 되어 떠나간다고 보았다. 성체제비는 귀환하여 수명이 다해 죽거나 기타 죽을 확률을 0.2로 계산하여 제비의 사망을 모델링 하였다. 이러한 부분적 모델들을 통합한 시뮬레이션모델인 Stock/Flow 다이어그램은 [그림 14]에서 보는 바와 같다.



[그림 13] 제비의 출생, 사망과 귀소에 관한 기본 모델링





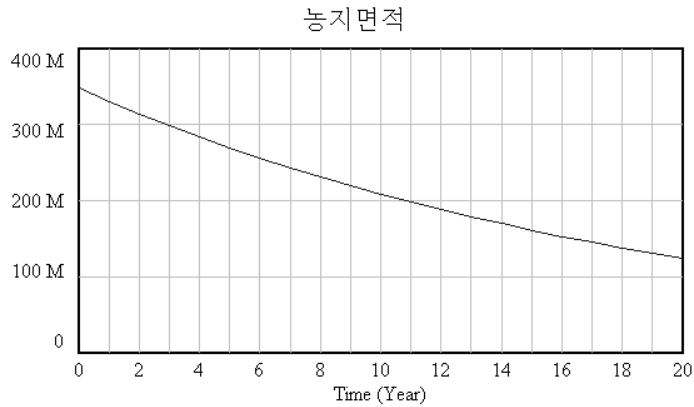
[그림 14] 제비 생태계 변화의 Stock/Flow 다이어그램

앞에서 작성한 모델의 시뮬레이션 결과는 [그림 15], [그림 16], [그림 17]에서 보는 바와 같다. 결론적으로 본 연구의 시뮬레이션 결과에 따르면 제비 개체수 감소의 주된 영향을 미치는 변수는 제비의 먹이(벌레)와 전통식주택수의 감소라고 할 수 있다. 위에서 살펴 본 바와 같이 두 변수는 지속적으로 감소하는 추세였다. 먹이의 균형이 깨지고 먹이로 인한 새끼제비의 사망률이 높아지면서 성체제비의 개체수에 영향을 미치게 되고, 성체제비는 사망의 원인보다는 학습을 통해 돌아오지 않는다는 것을 보여주는 결과이다.

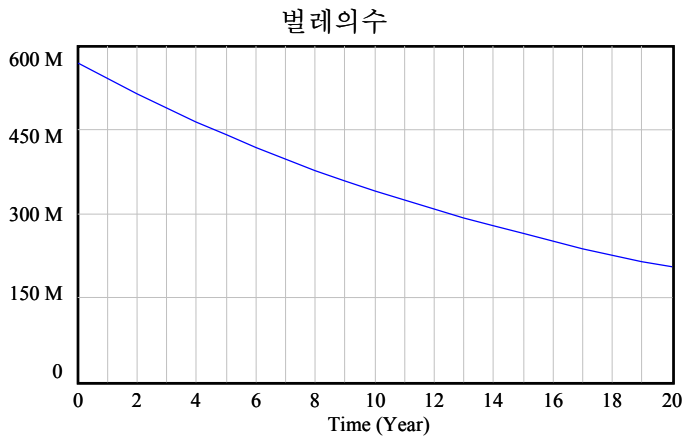
보급자리가 줄어드는 것은 제비가 산란하지 못하는 큰 이유로서 총 산란수에 확률 값을 곱하여 계산하게 되면 산란수는 감소할 수밖에 없는 것이다. 제비가 보급자리를 지으려는 이유는 산란을 위해서이기 때문에 보급자리로 인한 제비의 사망과는 직접적인 관련이 없지만 산란을 하지 못하면 서식지 환경이 나쁘다는 것이 학습을 통해 제비가 돌아오지 않도록 하는데 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 그 결과 제비는 20년 사이에 1/100 정도로 감소할 수밖에 없는 시뮬레이션 결과가 나타난 것이라고 판단된다. 즉, 먹이와 보급자리의 균형이 깨

진 당연한 결과이며 이는 마치 도시에서 인구수와 주택 및 일자리의 균형이 깨졌을 때 도시가 쇠퇴하고 사회적 진출로 인해 인구가 감소하는 것과 같은 이치라고 볼 수 있다.

[그림 15]는 농지면적의 감소와 농약사용으로 인해 벌레의 수가 급격히 줄어들고 있음을 보여주고 있다. 급격한 벌레의 감소는 개체수 감소의 가장 큰 원인임을 알 수 있다.



농지면적 : base \_\_\_\_\_

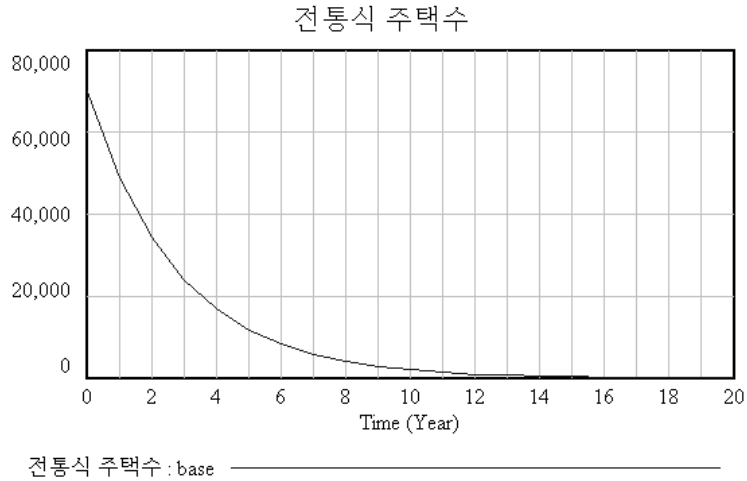


벌레의 수 : Current \_\_\_\_\_

[그림 15] 기본모델의 도시화에 따른 농지면적 변화

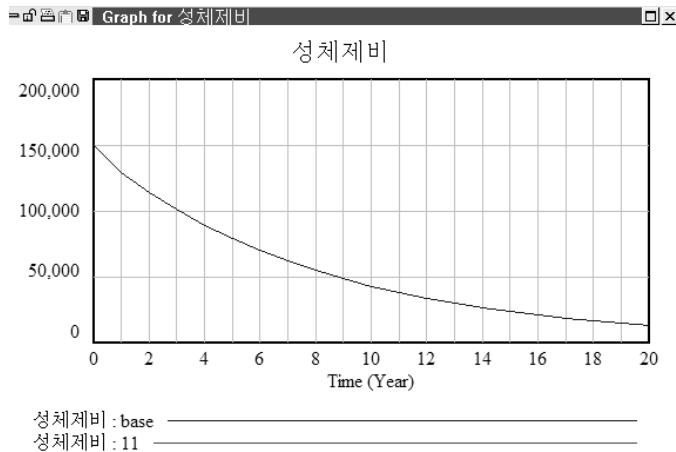
한편, 사례지역에서의 전통식 주택수는 [그림 16]에서 보는 바와 같이 도시화에 따른 연간 개량을 30%에 따라 지속적으로 줄어들기 시작하여 7만개의 전통 주택수가 20년 안에 55개의 주택수로 줄어드는 결과를 보여주고 있다. 도시화와 산업화에 따른 APT건축과 처마가 없는 건물들의 등장을 시점으로 전통식 주택의 수는 급격히 감소하기 시작하였으며

그에 따라서 제비 개체수를 급격히 감소시키는 결과가 초래되었다. 제비 생태계에서 나타난 보금자리의 불균형은 제비가 1/100로 줄어든 가장 큰 원인이라고 할 수 있다.



[그림 16] 기본모델의 전통식 주택 가구수 변화

[그림 17]은 서식지로 귀소 하는 15만 마리의 성체제비를 시뮬레이션 한 결과 20년 사이에 제비가 귀소 하는 숫자가 급격히 줄어들었고, 이러한 시스템의 행태가 지속적으로 제비 생태계에서 일어남으로써 20년 사이에 제비의 개체수가 1/100로 줄어든 것을 보여주는 시뮬레이션 결과이다.



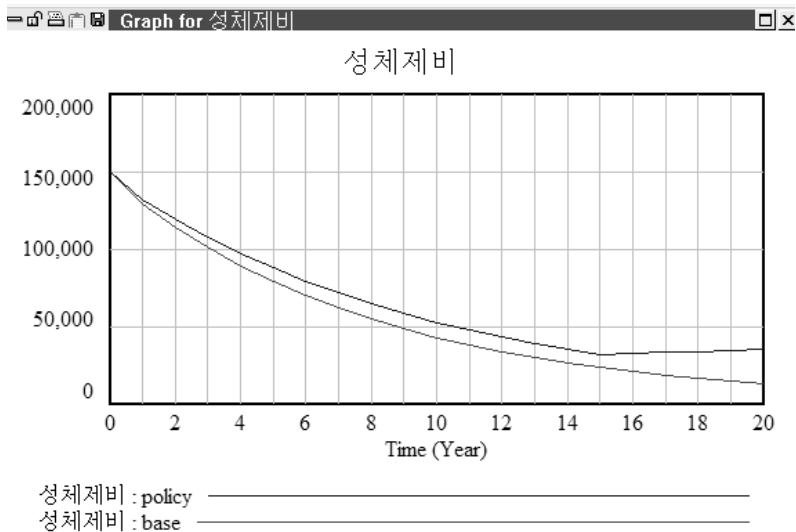
[그림 17] 기본모델의 성체제비 개체 수 변화

## 2. 정책 모델의 분석

주요 변수가 되는 농약살포, 농경지면적의 감소, 전통식 주택의 감소의 세 부분에 대해 각각의 정책변수를 설정하였다. 모든 정책변수들에 STEP함수를 사용하여 5년 10년 15년 뒤에 강제적으로 집행효과가 나타나게 하는 방법을 사용하였고 영향력 보다는 현실성을 고려하여 변화율변수에 작은 값을 설정하였다.

첫 번째로 적용한 환경 개선정책은 친환경정책이다. 농약 살포가 벌레에게 미치는 영향을 줄이기 위해 근본적으로 농약을 사용하지 않는 부분을 장려 하는 것으로 친환경정책은 STEP함수를 사용하여 5년 뒤에 작용하게 설정하였다. 두 번째 환경정책은 귀농장려를 통한 재래식의 농촌주택 건설을 늘리는 경우이며, 세 번째 친환경정책은 전통식주택에 대한 세금감면을 통해 전통식 주택의 개량을 억제하는 경우이다.

[그림 18]은 결과적으로 세 가지의 정책의 효과는 정책을 사용하지 않았을 때 보다는 1000마리의 증가라는 차이를 보이지만(10년 후의 그래프 곡선의 변화) 시간이 흐를수록 근본적으로는 제비의 수가 과거보다는 늘지 않고 줄어드는 패턴을 보일 수밖에 없는 결과를 보여주고 있다. 그러나 전통주택의 건설을 장려하거나 먹이의 균형을 유지하는데 도움이 되는 농경지를 보호하고 늘릴 경우에는 제비의 개체수가 약간은 증가할 수 있는 가능성이 있는 것으로 분석되고 있다.



[그림 18] 정책의 영향을 받은 성체 제비 개체 수

## VI. 결론

앞에서 분석한 인과지도 및 시뮬레이션을 통하여 우리나라 제비의 수가 급격하게 감소하게 된 원인인 농촌지역의 개발과 그로인한 제비 생태계의 변화, 그리고 여기에서 촉발된 제비 개체수 변화의 역동성을 살펴보았다. 분석결과 이 연구에서 개발된 시스템다이내믹스 시뮬레이션 모델은 100분의 1로 줄어든 제비 개체수 감소의 동태성을 설명하는데 있어 적합한 결과를 보여주었다. 또한 분석결과로 발견된 중요한 사실은 제비 개체수 감소의 역동적 메커니즘이 존재하고 있으며, 그것은 제비의 둥지와 먹이의 감소와 그에 따른 귀소율의 감소가 지속적으로 영향을 미치는 인과순환적 피드백 구조에서 기인한다는 것이다. 바로 이러한 피드백 구조로 인해 20년 사이에 우리나라 제비의 개체수가 100분의 1로 줄어들 수밖에 없었다는 것이다.

또한 이 연구에서는 제비의 개체수 감소를 초래하는 악순환 고리를 끊을 수 있는 정책으로서 어떠한 정책이 귀소율을 높여 줄 수 있는지 그 가능성을 확인하였다. 그러나 제비의 개체수와 귀소율을 높이기 위해 사용한 다양한 정책들이 비록 그 효과가 미약하게는 나타나고 있으나 이는 시간의 문제라고 판단된다. 즉, 이미 망가진 서식지 환경이 복원되기 위해서는 장기적인 시간지연이 발생하지만 결국 생태계를 복원하려는 정책적 노력은 선순환 고리들로 연결된 양의 피드백 루프이기 때문에 특정한 시점(임계지점) 이후에는 더 많은 제비가 번식하고 월동지로부터 귀소하는 효과를 가져 올 것이다. 물론 다른 한편으로는 그나마 남아있는 개체수를 유지하기 위한 노력의 일환으로써 특정구역에서나마 제비보호구역 설정하여 일정 수의 제비 개체수를 유지하여야 할 필요성이 있다고 판단된다.

### 【참고문헌】

- 경향잡지. (1992). 『사라지는 제비, 인간의 어리석은 욕망』 4월호.
- 국립생물자원관. (2008). 『야생동물 개체군의 생태학적 특성연구』.
- 김도훈·문태훈·김동환. (1999). 『시스템 다이내믹스』. 대영문화사.
- 김인규. (2001). 『제비의 번식행태 및 귀소성에 관한 연구』. 공주대대학원 석사학위논문.
- 김인규·함규황. (2001). “제비의 번식 생태에 관한 연구”. 『한국조류학회지』 제8권 1호, 1-9, 두산백과사전 <http://www.encyber.com>
- 문화일보. (2004). “제비가 사라진 수도권 생태환경 대책 서둘러야”. 9월 20일자.
- 원병오 외. (1969). “표지방조에 의한 한국산 철새집단의 계절적 분포와 그의 생태”. 『경희대학교 논문집』, 6: 305-346.
- 정다미 외. (2008). “강남 갔던 제비는 다시 돌아올까?-제비의 귀소성과 번식생태에 관한 3년간의 실험”. 제54회 전국과학전람회 수상작.
- 정대영. (2008). “그 많던 지렁이와 제비는 어디로 갔을까?”. 『ie매거진』 제15권 제1호, 39-40.
- 조선일보. (2005). “20년 사이 100분의 1이 된 제비”. 9월 6일자.
- \_\_\_\_\_. (2009). “돌아오지 않는 제비”. 5월 9일자.
- 한현진. (2009). “제비의 영소지 선택과 번식 생태”. 경희대 대학원 석사학위 논문.
- e-나라지표, <http://www.index.go.kr>
- EBS. (2009). “하나뿐인 지구, 제비 돌아오다”. 5월 14일자.