

# 시스템 다이내믹스를 이용한 신두리 해안사구의 보전방안

## Conservation Method of Sindu-ri Coastal Dune using System Dynamics\*

석영선\*\* · 유수진\*\*\* · 송기환\*\*\*\* · 전진형\*\*\*\*\*

Seok, Youngsun · You, Soojin · Song, Kihwan · Chon, Jinhyung

### Abstract

The purpose of this study is to analyze the land-use changes in the coastal areas using system dynamics modeling and to provide directions for effective management to maintain coastal dune areas. This research process consists of four steps: First, we built the basic model based on the causal loop diagram which was analyzed the land-use change of Sindu-ri Coastal Dune. Second, a time series land-use change map using Arc Map was established. Third, the validity of the basic model was tested. Finally, three simulations were performed for the cut over area(100,000m<sup>2</sup>/y, 150,000m<sup>2</sup>/y, 200,000m<sup>2</sup>/y) of windbreak for maintaining the coastal dune areas. Simulation of the basic model showed that the area of the coastal dune will be consistently decreased. Based on the simulation, if windbreak were cut down 150,000 m<sup>2</sup>/y, windbreak area will be restored to the target area in 2019. This study has the limitation which the simulation is progressed with a limited variable: area. Therefore, the modeling of coastal dune should be reflected various variables in the further study.

**Keywords:** 토지이용 변화, 생태·경관보전지역, 곰솔(*Pinus thunbergii*), 방풍림  
(Land-use change, Ecological Landscape Protected Area, *Pinus thunbergii*, Windbreak)

\* 이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구  
구사업입(NRF-2013R1A1A2013456)

\*\* 한국문화관광연구원 연구원(제1저자, suni87@korea.ac.kr)

\*\*\* 고려대학교 대학원 환경생태공학과 박사과정(공동저자, 11ysj@korea.ac.kr)

\*\*\*\* 고려대학교 대학원 환경생태공학과 석사과정(공동저자, hyulsamoon@korea.ac.kr)

\*\*\*\*\* 고려대학교 환경생태공학부 부교수(교신저자, jchon@korea.ac.kr)

## I. 서론

해안지역은 해양, 갯벌, 연안 등의 해안생태계와 육상생태계가 접하는 곳으로 생태, 문화, 역사, 경관 자원이 풍부한 곳이다(장동호·박지훈, 2010: 74-75). 해안지역에 형성된 해안사구는 바다에서 육지 방향으로 불어온 바람에 의해 모래가 쌓여 형성된 모래언덕으로 염분토양에 적응한 사구성 동·식물들의 서식처 기능, 지하수 및 담수 저장 기능을 가지고 있다(Nordstrom *et al.*, 1990: 1-38; García-Mora *et al.*, 2000: 990-993; Williams *et al.*, 2001: 1937-1938). 또한 모래 순환을 통해 해일, 태풍 등의 자연재해로부터 연안지역을 보호하는 자연 방파제 역할을 한다. 최근에는 독특한 해안경관, 지질경관에 대한 가치를 인정받아 생태관광지로 가치가 높아지면서 방문객이 증가하고 있다(해양수산부, 2003: 1-62; 환경부, 2011). 그러나 거주 주민과 관광객 증가는 주택, 논, 밭, 도로, 숙박시설 등의 개발활동을 유발하였으며, 그 결과 해안사구의 면적이 감소하는 현상이 나타나게 되었다(최지연, 2005: 5-8).

충남 신두리 해안사구의 경우, 개발지역의 범위 확산으로부터 자원을 효율적으로 보호하기 위해 북쪽지역을 생태·경관보전지역 및 천연기념물로 지정하고 해안사구의 면적을 유지하기 위해 노력하고 있다(환경부, 2011: 124-126). 그럼에도 불구하고 신두리 해안지역이 포함된 충남 태안은 급격한 모래 유실로 1년 사이 해안선이 육지쪽으로 약 26m 후퇴하고 약 37cm가 침식된 것으로 나타나면서 해안선의 변화가 극심하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다(국립공원관리공단, 2012.08.14.). 이는 생태·경관보전지역임에도 불구하고 해안사구 면적이 지속적으로 감소하는 문제가 발생하고 있음을 의미하는 것으로, 석영선 외(2014)의 연구에서 시스템 사고를 통해 해안사구 면적 변화 현상에 대한 인과순환 관계를 고찰하여 두 가지 원인을 도출하였다. 첫 번째 원인은 해안사구 및 해안사구 주변지역의 직·간접적인 개발이다. 해안사구 내의 관광시설 설치로 인해 직접적으로 북쪽 해안사구가 훼손되고 있으며(SBS뉴스, 2014.12.20.), 남쪽지역은 해수욕장, 숙박시설 등의 개발로 인한 지형 훼손 문제로 북쪽 해안사구에 영향을 미치고 있다(조광우 외, 2006: 53-69). 즉 신두리 해안지역 남쪽의 개발지역과 북쪽의 생태·경관보전지역은 행정적으로 경계가 구분 되어있을 뿐, 사실상 연결되어 있는 공간이기 때문에 해안사구가 보호지역으로 지정이 되어 있다 하더라도 남쪽지역에서 나타나는 개발행위에 영향을 받는 것이다(환경부, 2011). 신두리 해안사구 면적 변화의 두 번째 원인은 해안사구 내에 인공식재 된 곰솔(*Pinus thunbergii*) 방풍림에 의한 것으로 나타났다. 과거 곰솔 방풍림은 자연재해로부터 해안사구 등의 자연자원과 주변의 주거지, 상업지, 논, 밭 등의 개발지역을 보호하기 위해 조성되었다(전근우 외, 2005: 197-198; 산림청 2006: 4-7). 그러나 곰솔 방풍림의 번식과 일정 수고 이상의 성장은 기존

방풍림의 목적과 달리, 모래순환 방해와 해안사구의 침식을 유발하면서 해안사구의 면적을 감소시키는 주요 원인이 되었다(명현호, 2010: 217-0224; 에코타임스, 2012.09.27.; JTBC 뉴스, 2012.11.16.). 그 동안 방풍림은 방재 및 생태적 기능이 우수한 자원으로 인식되면서 벌목, 벌채와 같은 관리 행위는 매우 미비하였다. 결과적으로 방풍림의 면적 급증에 따른 해안사구의 면적 감소는 더 심각해 질 것으로 예상된다(석영선 외, 2014). 특히, 곰솔 방풍림 조성 당시에는 예상하지 못했던 문제가 발생하였다는 점에서 해안사구 면적과 방풍림 면적 변화 관계에 대한 주의를 기울여야 할 것이다.

이처럼 한번 훼손된 해안사구 면적은 회복되기 어렵기 때문에 해안사구의 면적을 유지하기 위한 노력이 지속적으로 필요할 것이다(UNEP, 1995: 80). 따라서 본 연구의 목적은 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 모델을 활용하여 신두리 해안지역의 토지이용 변화 패턴을 파악하고, 해안사구의 면적 유지를 위한 관리방안을 제시하는 것이다. 시스템 다이내믹스를 이용한 연구는 시간의 흐름을 반영한 정량적 분석이 가능하기 때문에 신두리 해안사구의 현상 추이를 반영한 보다 자세한 분석을 통해 효율적인 관리방안 제시를 가능하게 할 것이다. 연구의 결과는 해안사구의 면적 유지를 위한 관리방안을 제안함으로써 해안사구의 보전, 지형 안정화, 해안 생태계 건강성 증진에 기여할 수 있을 것이다.

## II. 연구범위 및 방법

### 1. 연구범위

연구의 공간적 범위는 충남 태안 신두리 해안지역으로 생태·경관보전지역 및 천연기념물로 지정된 신두리 해안사구가 위치해 있다(그림 1). 신두리 해안사구는 길이 약 3.4km, 너비 약 0.5~1.3km에 이르는 모래언덕으로 서해안지역 관광 거점으로 주목 받고 있다. 최근 국내에서는 보지 못했던 모래선녀버섯과 백사장 눈물버섯 등이 발견되면서(연합뉴스, 2014.08.11.) 연구 대상지로 새롭게 가치를 조명 받고 있지만 모래 채취, 주변 개발, 답압, 인공식재, 보행로 개설 등으로 인해 지속적인 훼손문제가 나타나고 있다.

연구의 내용적 범위는 선행연구(석영선 외, 2014)에 따라 신두리 해안사구의 보전방안 중, 면적 보호 방안 마련에 목적을 두고자 ‘신두리 해안지역의 토지이용’으로 한정하였다. 신두리 해안사구의 면적에 영향을 주는 변수는 ‘개발지역’, ‘방풍림’으로 설정하였으며 이외의 지역은 ‘기타지역’으로 분류하였다. 특히 방풍림은 현재 신두리 해안지역의 우점종인 곰솔(*pinus thunbergii*) 단일수종으로 범위를 한정하였다.

마지막으로 기본 모형의 행태분석 및 시물레이션을 위한 시간적 범위는 데이터의 축적과 모델이 안정화(Steady-state)되는 상태를 고려하여 2040년까지를 추론하였으며, 신두리 해안사구가 생태·경관보전지역으로 지정된 2002년을 중요 시점으로 하여 신두리 해안사구의 면적 변화를 분석하였다.



[그림 1] 대상지 위치

## 2. 연구방법

본 논문에서는 석영선 외(2014)의 연구에서 작성된 인과순환지도를 바탕으로 신두리 해안사구의 면적 유지를 위한 정량적 분석을 위해 다음과 같은 순서로 연구를 진행하였다. 첫째, 시물레이션을 위한 기본 모형을 작성하였다. 기본 모형의 작성은 STELLA Ver. 10.0.4(isee systems, 2014)를 이용하였다. 둘째, 신두리 해안지역의 토지이용 변화에 대한 시계열 데이터를 구축하였다. 신두리 해안지역의 토지이용 시계열 데이터를 구축하기 위해 ArcMap Ver. 10.2.2(ESRI, 2014)을 이용하여 점격자법(Dot-grid method) 분석을 적용하였다. 점격자법은 일반적으로 지도상의 지역, 항공사진의 면적을 산출할 때 이용하는 방법으로, 일정 간격을 점(Point)으로 변환한 후 변환된 점의 수로 면적을 구하는 방법을 의미한다(Bellhouse, 1981: 303-304). 셋째, 기본 모형 작성, 행태 분석 및 구축된 시계열 데이터와의 비교를 통해 기본 모형의 타당성을 확인하였다. 넷째, 시나리오 작성 및 시물레이션을 통해 해안사구의 면적 유지를 위한 관리방안을 제시하였다.

### III. 신두리 해안지역의 토지이용 변화 시뮬레이션

#### 1. ‘신두리 해안지역의 토지이용 변화’ 인과순환지도

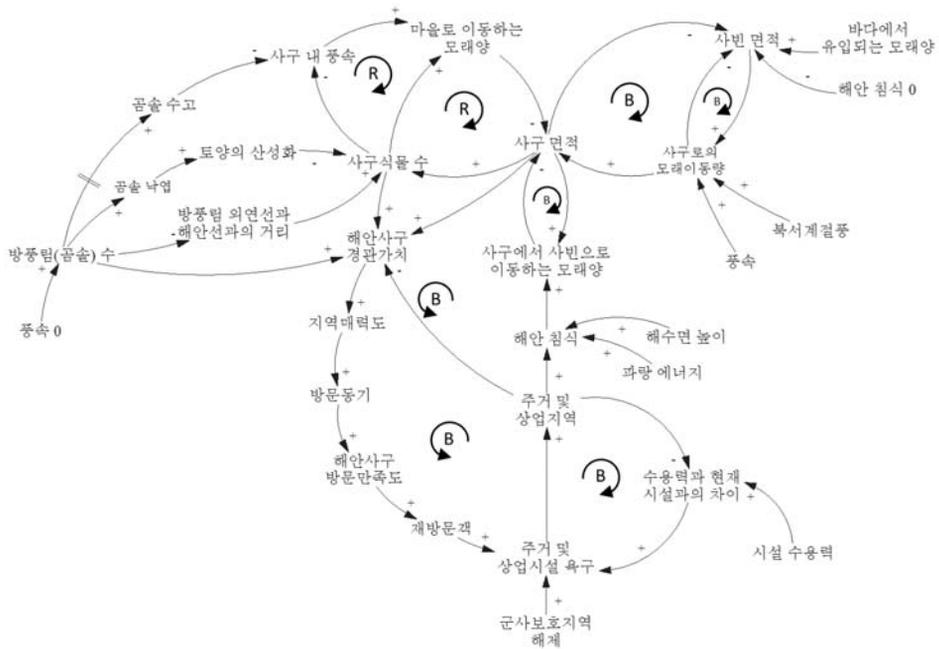
신두리 해안지역의 토지이용 변화에 대한 시뮬레이션은 석영선 외(2014)의 ‘신두리 해안 지역의 토지이용과 경관가치에 대한 인과순환지도’를 기초로 하였다(그림 2).

해안사구는 바다쪽에서 육지쪽으로 불어오는 바람에 의해 모래가 쌓여 이루어진 지형이다. 즉 평상시 해안사구는 바다의 모래가 운반되어 퇴적된 사빈(Sand beach)에서 모래를 공급받게 되며, 사빈에서 사구로 이동되는 모래가 많을수록 해안사구가 저장하고 있는 모래 양은 많아지고 면적은 넓어진다. 이는 곧 해안사구를 서식지로 하는 사구식물(Dune plants)의 개체수가 증가될 수 있는 토대가 되면서 결과적으로 사구면적을 증가시키게 된다. 사구 식물의 밀도와 높이가 풍속에 영향을 미치면서 직·간접적으로 이동 중이던 모래를 제어하거나 방해하여 더 많은 모래가 저장될 수 있도록 하기 때문이다(Bressolier & Thomas, 1977: 331-333; 환경부, 2011). 이때 해수면의 높이와 파랑에너지(Wave Energy) 등에 의해 해안침식이 발생하면 자연의 섭리에 따라 자연적으로 사구에 있던 모래가 사빈으로 이동하면서 해안사구의 전체 모래량은 다시 감소하게 된다(Carter, 1991: 29; Martinez & Psuty, 2004: 2-64; 육근형 외, 2008: 24-27). 결과적으로 해안사구의 시스템은 일정하게 유지되는 균형루프가 나타난다.

신두리 해안지역은 1990년대 이후, 군사지역이 해제되면서 남쪽지역은 주거, 논, 밭, 상업지역 등으로 토지 개발이 이루어졌다. 이와 같은 토지이용의 변화로 사구 뒤쪽에는 해풍 및 모래바람, 바다로부터 받는 피해를 최소화하기 위해 방풍림이 인위적으로 조성되었다. 인공 식재된 방풍림은 독특한 해안경관 형성과 생물다양성을 유지시키는 중요 자원이 되었지만(육근형 외, 2008; 32-42), 최근 해안사구를 훼손시키는 원인으로 나타났다(JTBC 뉴스, 2012.11.16.). 이는 방풍림의 주요 수종으로 식재되는 곰솔이 해안선 쪽으로 번식하는 속도가 빠르면서 해안사구의 면적을 감소시키기 때문으로 사료된다. 또한 방풍림의 수고(Tree height)가 4m 이상으로 성장하면서 사구의 모래 순환을 방해하거나 모래를 유실시킬 뿐만 아니라 떨어진 낙엽이 토양을 산성화시켜 염분·건조환경에 적응한 사구식물의 고사와 생육저하를 초래했기 때문으로 분석되고 있다(명현호, 2010: 217-224). 한편, 주거 및 상업지역 등의 토지이용 변화는 걱정 범위 내에서는 지역경제 성장과 같은 매력요인이 될 수 있지만 한계수용 범위 이상에서는 환경변화와 같은 시스템의 불균형을 초래할 수 있으며, 직접적으로 해안경관을 훼손시킨다(이상문 외, 2007: 23-26). 신두리 해안지역은 한계수용 범위 이상의 난개발 및 방문객 증가로 인해 자연자원인 해안사구가 훼손되고 있는 것으로 나

타났다(윤진숙 외, 2003; 최지연, 2005: 5-8). 따라서 방문객 유치와 방문 만족도, 재방문을 위해 긍정적인 영향을 주기 위해서는 한계수용력에 대한 이해와 실질적으로 지역의 매력도를 높이는 경관 구성요소에 대한 관리가 필요하다(박종철·안대회, 2014: 80-87). 이는 곧 해안경관을 구성하는 해안사구의 면적 증가가 곧 해안경관의 가치를 증가시킬 수 있으며, 관광자원으로서 관광객 재방문 유도를 통한 지역 경제 성장에도 기여 할 수 있음을 시사한다.

결과적으로 시스템 사고적 측면에서의 접근을 통해 개발지역의 증가뿐만 아니라 해안경관 구성요소인 방풍림이 해안사구에 부정적인 영향을 미치는 요인임을 확인할 수 있었다. 즉 방풍림은 생물다양성을 높이고 해안경관을 구성하며 자연재해로부터 지역을 보호하는 중요 자원이지만 주변 자연자원에 부정적인 영향도 줄 수 있는 것으로 나타남에 따라 적합한 관리방안 마련이 이루어져야 될 것으로 사료된다. 이에 따라 본 연구에서는 신두리 해안사구의 면적을 중심으로 방풍림 관리 면적에 대한 시뮬레이션 모형을 구축하였다.

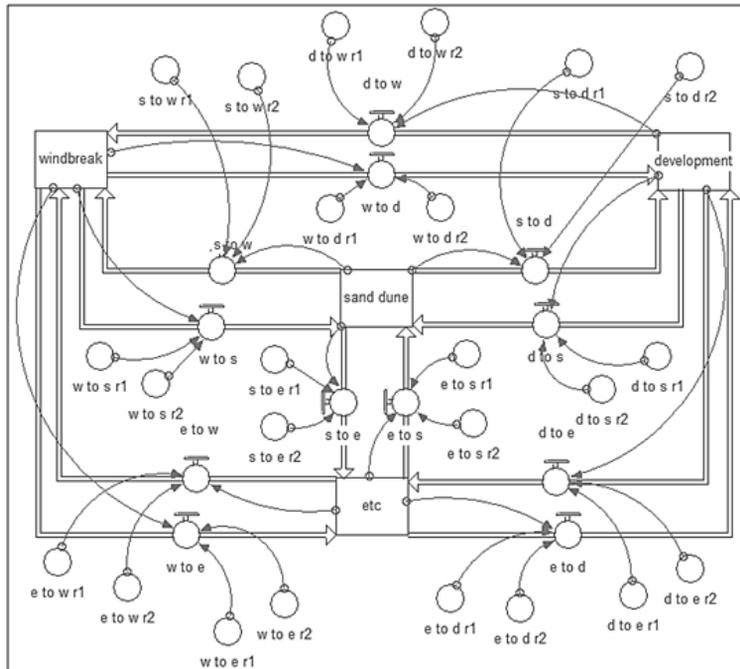


[그림 2] 신두리 해안지역의 토지이용과 경관가치에 대한 인과순환지도  
 자료: 석영선 외, 2014

## 2. ‘신두리 해안지역의 토지이용 변화’ 기본 모형

신두리 해안지역의 인과순환지도를 바탕으로 시뮬레이션을 위해 작성된 기본 모형(Basic model)은 [그림 3]과 같다. 기본 모형은 “토지이용 변화는 신두리 해안사구의 면적 변화에 영향을 미칠 것이다.” 라는 가정을 토대로 작성하였으며, 신두리 해안지역의 면적 변화를 시스템 경계로 설정하였다. 기본 모형의 주요 변수는 실제 데이터 및 객관적 검증이 가능한 데이터만을 반영하기 위해 해안사구, 개발지역, 방풍림, 기타지역으로 단순화하였으며 자세한 데이터 및 수식은 [부록]으로 제시하였다.

논문에서 제시한 수준변수는 크게 해안사구, 개발지역, 방풍림, 기타지역 4부분으로 구분하였으며 수준변수에 영향을 주는 변화율변수는 해안사구에서 개발지역, 방풍림, 기타지역으로 변화된 비율과 개발지역에서 해안사구, 방풍림, 기타지역으로 변화된 비율, 방풍림에서 해안사구, 개발지역, 기타지역으로 변화된 비율, 기타지역에서 해안사구, 개발지역, 방풍림으로 변화될 비율로 보았다. 각 변화율변수에 영향을 미치는 보조변수는 2002년부터 2007년, 2007년부터 2013년까지 변화된 각 면적의 증가율을 이용하여 산출하였다.



[그림 3] 신두리 해안지역 토지이용 변화에 대한 기본 모형

### 3. ‘신두리 해안지역 토지이용 변화’ 기본 모형의 데이터 구축

신두리 해안지역의 토지이용 변화에 대한 시계열 데이터를 구축하기 위해 환경부에서 제공하는 2002년, 2007년, 2013년 중분류 토지피복지도(1:25,000 축척) 자료를 수집하여 분석하였다. 중분류 토지피복지도는 해상도가 5M급이기 때문에 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)을 활용해 5m로 래스터(Raster)화하여 정확성을 높인 후 점격자법 분석을 통해 면적을 산출하였으며, 선행연구(서종철, 2002)와 위성지도를 기반으로 분석 내용을 확인하였다.

2002년부터 2013년까지의 신두리 해안지역 면적 추이를 분석한 결과, 해안사구의 면적은 2007년까지 증가하다 이후 2013년까지 지속적으로 감소하였다<표 1>. 반면 방풍림의 경우에는 2007년을 기점으로 면적이 급증하는 것으로 나타나 최근 연구들과 같이 방풍림이 해안사구에 영향을 미치는 주요 요인임을 확인 할 수 있었다. 특히 신두리 해안지역의 방풍림은 국립공원관리공단 관리 하에 있는 해안사구 뒤편에 자리하고 있기 때문에, 수목의 진정 및 간벌에 제약이 있는 상황에서 높은 자연번식률로 인해 해안사구에 미친 영향이 컸을 것으로 판단된다. 한편 개발지역과 기타지역은 2002년부터 면적이 약간 감소하거나 변화율이 미미한 것으로 나타나면서 신두리 해안지역이 관광객 유치를 위한 개발이 활발하게 이루어졌을 것으로 예측되었던 것과는 상반되는 결과로 나타났다. 이러한 결과는 신두리 해안사구가 생태·경관보전지역 및 천연기념물 지정, 국립공원관리공단 관리 범주에서 지속적인 관리와 법적인 보호가 이루어지고 있기 때문으로 판단된다. 또한 해수욕장 개발로 인해 토지이용이 주거지역보단 상업지역으로 변화되면서 개발에 있어 계절적인 부분이 영향을 미쳤을 것으로 보인다.

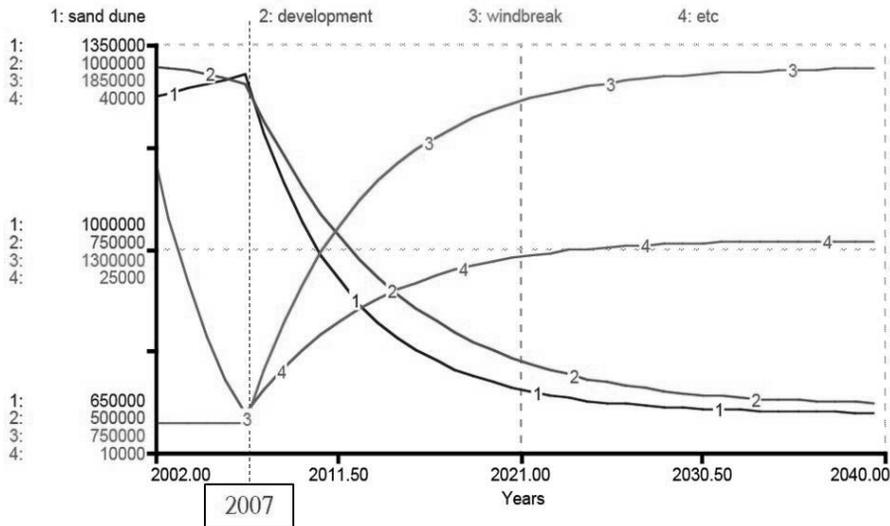
<표 1> 신두리 해안지역의 토지이용 면적 시계열 데이터(단위: m<sup>2</sup>)

구분	2002년	2007년	2013년
해안사구	1,239,550	1,280,950	884,375
개발지역	962,025	940,800	723,000
방풍림	792,900	794,100	1,400,000
기타지역	32,625	11,250	19,725
총 면적		3,027,100	

#### 4. ‘신두리 해안지역 토지이용 변화’ 기본 모형의 행태 및 타당성 분석

기본 모형의 행태 분석은 현상의 추세를 반영하는 것으로써 모델이 특별한 정책, 활동 등의 개입 없이 현상이 유지된다고 할 때, 각 변수들의 시뮬레이션 결과를 말한다. 시뮬레이션 결과를 나타내는 그래프의 가로축은 시간의 흐름, 세로축은 변수들의 수치를 의미한다.

신두리 해안지역의 구축된 기본 모형을 통해 2002년부터 2040년까지의 토지이용에 대한 추세를 분석한 결과, 특별한 관리방안이나 정책대안이 제시되지 않고 현상이 유지된다면 2007년부터 2022년까지 해안사구의 면적은 급감하는 것으로 분석되었다(그림 4). 반면 해안사구의 훼손원인인 방풍림의 면적은 2007년을 기점으로 면적이 급증하는 것으로 나타났다. 이러한 행태는 신두리 해안지역이라는 한정된 범위에서 면적 변화를 분석했기 때문으로 판단된다.



[그림 4] 기본 모형의 시뮬레이션 결과

신두리 해안지역은 결과적으로 시간이 흐르면서 토지별 이용행태가 안정화될 것으로 예측된다. 하지만 생태·경관보전지역, 천연기념물인 신두리 해안사구의 면적 감소로 상태가 안정화될 것으로 예측되었기 때문에 해안사구의 훼손원인에 대한 적합한 관리방안 마련이 시급히 이루어져야 한다.

신두리 해안지역의 기본 모형에 대한 타당성 검증을 위해 시계열 데이터와 기본 모형의

시물레이션 결과 값을 비교, 분석하였다<표 2>. 분석 결과, 실제 시계열 데이터와 시물레이션 결과 값이 근사치를 보임에 따라 구축된 기본 모형이 비교적 안정된 모델이라 판단하였다.

<표 2> 실제 데이터와 기본 모형의 시물레이션 결과 비교(단위: m<sup>2</sup>)

		2002년	2007년	2013년
해안사구 면적	실제 데이터	1,239,550	1,280,950	884,375
	시물레이션	1,239,550	1,280,810	884,332
개발지역 면적	실제 데이터	962,025	940,800	723,000
	시물레이션	962,025	940,366	723,105
방풍림 면적	실제 데이터	792,900	794,100	1,400,000
	시물레이션	792,900	793,934	1,399,952
기타지역 면적	실제 데이터	32,625	11,250	19,725
	시물레이션	32,625	11,989	19,710

## 5. 시나리오 설정 및 분석

### 1) 시나리오 설정

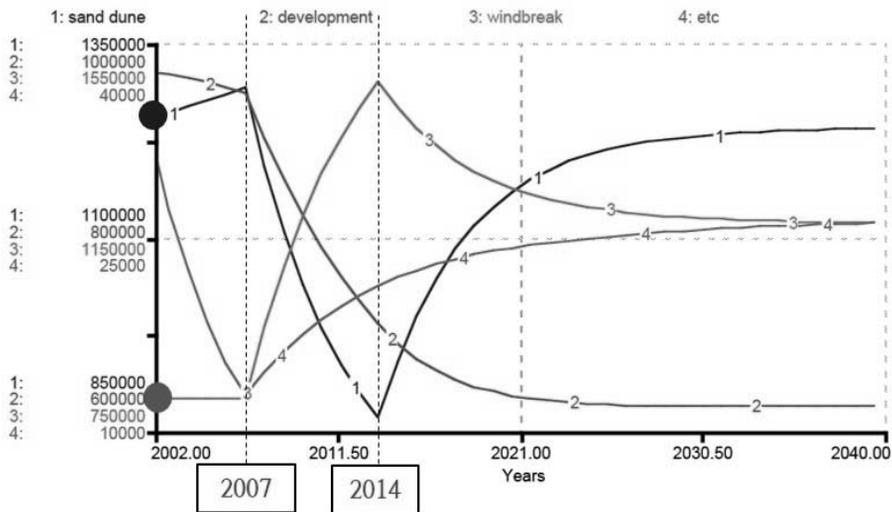
신두리 해안지역의 방풍림은 대부분 사구 뒤편에 위치해 있으며 해안지역 보호 및 생물 다양성을 유지시키는 중요 자연자원으로 벌채, 벌목 등에 제약이 있다. 하지만 방풍림이 선행연구 및 기본 모형 시물레이션 분석을 통해 신두리 해안사구에 영향을 미치는 주요 요인으로 대두됨에 따라(석영선 외, 2014), 방풍림 벌채 면적에 따른 사구 면적의 추이를 분석하기 위해 기본 모형을 토대로 3가지 시나리오를 제시하였다<표 3>. 시나리오에서 제시한 방풍림 벌채 면적은 산림청 「기준벌기령 및 벌채·굴취기준」의 한계 벌채 면적을 참고하여 작성하였다. 시나리오1은 2014년~2040년까지 매년 10만m<sup>2</sup>의 방풍림을 벌채 하였을 경우의 해안사구 면적 변화를 분석하였다. 시나리오2는 2014년~2040년까지 매년 15만m<sup>2</sup>의 방풍림을 벌채하였을 경우를, 시나리오3은 2014년~2040년까지 매년 20만m<sup>2</sup>의 방풍림을 벌채하였을 경우를 가정하여 신두리 해안사구의 면적 변화 양상을 파악하였다.

〈표 3〉 시나리오 설정

구분	시나리오
시나리오1	2014년~2040년까지 매년 10만㎡의 방풍림 면적 벌채
시나리오2	2014년~2040년까지 매년 15만㎡의 방풍림 면적 벌채
시나리오3	2014년~2040년까지 매년 20만㎡의 방풍림 면적 벌채

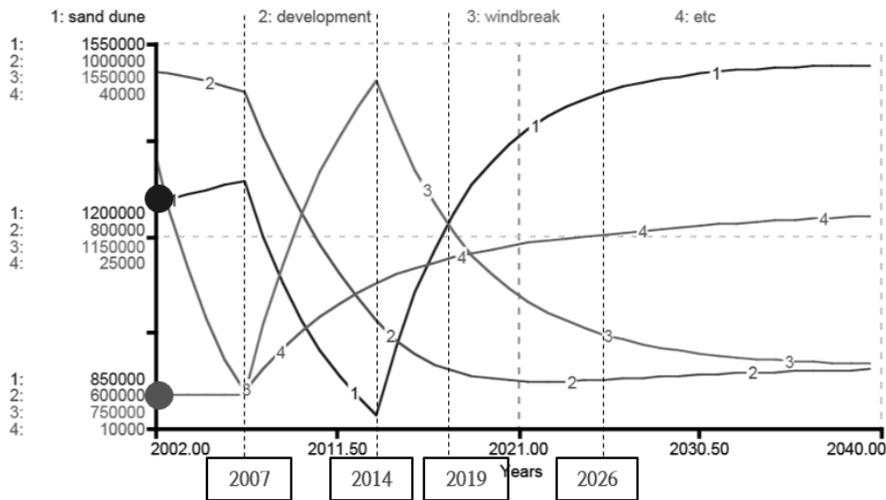
## 2) 시나리오 분석

매년 방풍림 면적의 10만㎡을 2014년부터 2040년까지 벌채하는 시나리오1의 경우, 벌채가 시작된 2014년 1,454,053㎡이던 면적이 2032년에 1,166,809㎡까지 감소되다, 2033년을 기점으로 변화가 안정화될 것으로 예측되었다[그림 5]. 반면 해안사구는 2014년까지 면적이 급감하다 2015년을 기점으로 면적이 점점 증가하는 것으로 나타났다. 특히 2030년 이후 해안사구의 면적이 2002년 생태·경관보전지역 지정 당시의 면적(1,239,550㎡)과 유사한 수치를 보여 결과적으로 신두리 해안지역의 토지이용 변화는 안정화될 것으로 예측되었다. 그러나 2040년까지 신두리 해안사구가 생태·경관보전지역으로 지정된 2002년 당시의 면적으로는 회복되지는 못하였다.



[그림 5] 방풍림 10만㎡ 벌채 시뮬레이션 결과(시나리오1)

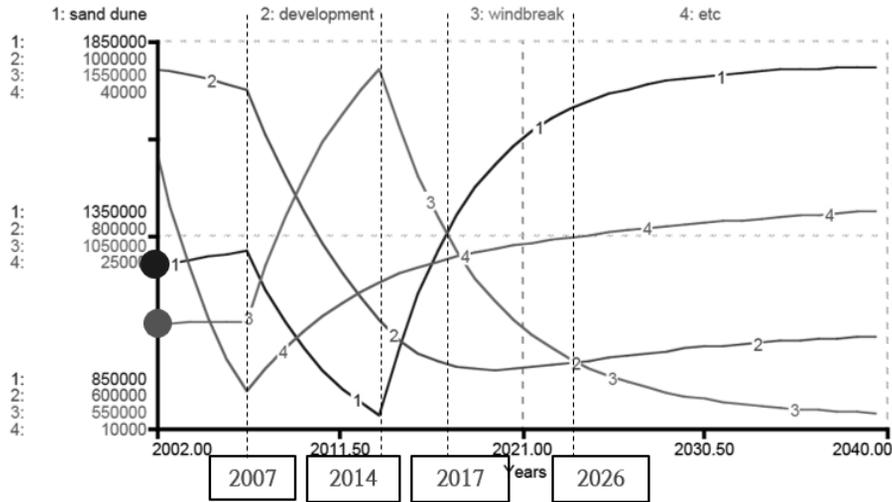
방풍림 벌채 면적을 10m<sup>2</sup>에서 15만m<sup>2</sup>로 변화시킨 시나리오2에 대한 시뮬레이션 결과, 2014년 이후 방풍림 면적은 감소하기 시작하면서 2030년을 기점으로 하여 안정화 상태로 접어들 것으로 예측되었다(그림 6). 반면 해안사구는 2015년 이후부터 면적을 회복하기 시작하여 2019년을 기점으로 하여 2002년 당시의 면적을 회복하였다. 한편 개발지역의 경우 2024년 이후로 면적이 미세하게 증가되는 것으로 예측되었는데 이는 2002년부터 2013년 까지 분석된 토지이용 변화 시계열 자료에서 해안사구에서 개발지역으로 변화된 비율보다 방풍림에서 개발지역으로 변화된 비율이 더 낮았기 때문으로 판단된다.



[그림 6] 방풍림 15만m<sup>2</sup> 벌채 시뮬레이션 결과(시나리오2)

방풍림 벌채 면적을 20만m<sup>2</sup>로 변화시킨 시나리오3에 대한 시뮬레이션 결과, 목표 연도인 2040년을 기점으로 해서 해안사구와 방풍림의 면적이 안정화될 것으로 예측되었다(그림 7). 특히 해안사구는 2015년 이후 면적이 증가, 2017년을 기점으로 2002년의 면적을 회복하는 것으로 나타났다. 이때, 방풍림은 2017년 면적(1,068,229m<sup>2</sup>)이 2002년 당시의 면적(792,900m<sup>2</sup>)보다 높게 나타났는데 이는 제한된 범위 안에서 시뮬레이션이 이루어졌기 때문으로 판단된다. 한편 2026년의 신두리 해안지역은 개발지역의 면적이 방풍림 면적보다 더 증가되는 것으로 나타났다. 결과적으로 2026년에 태풍, 해일 등이 발생할 경우, 방파제 역할을 해주던 방풍림의 기능이 축소되어 논, 밭, 주거, 상업시설 등의 개발지역이 큰 피해를 받을 것으로 예측된다. 따라서 방풍림 벌채에 있어 무계획적인 시도보다는 정확한 관리 면적의 산정과 위치, 기간 조절 등의 체계적이고 분석적인 기준이 마련되어야 하며, 해안사구

와 방풍림 간의 비교, 분석에 대한 연구도 추가적으로 수행되어야 할 것이다.



[그림 7] 방풍림 20만 $m^2$  벌채 시뮬레이션 결과(시나리오3)

## VI. 결론

본 연구에서는 생태·경관보전지역으로 지정된 신두리 해안사구의 보전을 위해 신두리 해안지역의 토지이용에 대한 면적 변화를 시스템 다이내믹스 모형을 통해 추정하였다. 먼저 신두리 해안지역의 토지이용 변화에 대한 기본 모형을 작성하고 시계열 데이터를 수집하여 신두리 해안지역 토지이용 변화에 대한 행태 및 타당성을 분석하였다. 다음으로 해안사구의 면적 유지 방안으로써 적정 방풍림 벌채 면적을 제안하기 위해 시나리오를 작성한 후 시뮬레이션을 실시하였다.

연구결과, 신두리 해안지역에 특별한 관리방안이나 정책대안 없이 현상이 유지될 경우, 해안사구의 면적은 지속적으로 감소될 것으로 분석되었다. 즉 해안사구의 면적이 2014년 852,605 $m^2$ 에서 2040년 697,279 $m^2$ 로 18%나 감소될 것으로 예측됨에 따라 해안사구 면적 유지를 위한 관리방안 마련이 시급한 것으로 나타났다. 특히 곶술 방풍림의 경우에는 2014년 1,454,053 $m^2$ 에서 2040년 1,759,285 $m^2$ 로 약 21% 가까이 면적이 증가될 것으로 나타나면서 방풍림 관리를 통한 해안사구의 면적 관리가 이루어져야 될 필요성이 있음이 시사되었다. 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과, 매년 10만 $m^2$ 의 방풍림 면적을 벌채하는 경우(시

나리오1)에는 2040년까지 신두리 해안사구가 생태·경관보전지역으로 지정된 당시의 면적으로 회복되지는 못하였지만 근사값을 보일 것으로 예측되었다. 또한 매년 15만m<sup>2</sup>를 벌채할 경우(시나리오2)에는 2019년을 기점으로 하여 해안사구의 면적이 2002년 당시로 회복될 것으로 나타났다. 반면 매년 20만m<sup>2</sup>을 벌채할 경우(시나리오3)에는 2017년에 해안사구의 면적이 2002년 당시의 면적을 회복할 것으로 예측되었지만 지속적인 벌채가 이루어질 경우, 2026년에 방풍림의 면적이 개발지역의 면적보다 감소할 것으로 나타났다. 이는 방풍림의 기능 상실을 의미하는 것으로 태풍, 해일 등의 자연재해로 인한 재산 및 인명 피해 가능성이 예측됨에 따라 방풍림 관리에 있어서도 적합한 벌채 면적 산출과 기간 조절 등이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이와 같은 방풍림 관리를 통한 해안사구의 면적 유지는 결과적으로 해안사구를 보전하는데 기여할 수 있다. 방풍림의 경우, 해안지역의 지형 및 생물다양성을 유지시키는 주요 해안경관 자원이지만 지속적인 해안지역의 유지를 위해서는 적합한 관리가 필요할 것으로 사료된다. 하지만 방풍림과 같은 자연자원의 경우, 작은 환경 변화에도 민감하게 반응하여 예상치 못한 결과를 초래할 수 있는 만큼 보다 체계적이고 단계적인 접근이 이루어져야 할 것이다. 즉 10년 단위의 장기계획 수립과 지속적인 모니터링을 기반으로 5년 단위로 계획을 수정, 보완해야 하는 과정이 필요하다. 이때 무엇보다도 수목의 생육환경과 지역특성에 대한 고려를 우선시해야 할 것이다. 이를 통해 해안사구 주변의 자연 수목에 대한 관리뿐만 아니라 인공조림 시 적합한 수종 선정과 관리방안 마련이 이루어질 수 있다. 또한 갯그렁, 갯쇠보리, 통보리사초, 갯완두와 같은 사구식물의 관리 및 연구도 함께 이루어져야 한다. 이외에도 해안지역의 산림, 녹지를 보호하고 해안사구 주변 지역의 인공경관 개선, 인공 시설물 지양, 해안사구의 중요성 홍보와 교육활동은 결과적으로 해안사구의 훼손 방지 및 면적 보호뿐만 아니라 경관적 가치와 생물다양성을 높이는 방안이 될 것이다.

본 연구는 지속적인 훼손문제가 대두되고 있는 신두리 해안사구의 면적 유지 관리방안을 제시하기 위해 대상지의 토지이용 변화 양상을 분석하고 적정 방풍림 벌채 면적을 제시하였다는 데에 의의가 있다. 연구의 한계는 방풍림 벌채에 따른 해안사구 면적 유지 방안을 제안함으로써, 방풍림 벌채 후 시간지연에 따라 발생하는 다양한 문제 및 방풍림을 서식지로 하는 동·식물들의 생태환경을 고려하지 못하였다는 점이다. 또한 시뮬레이션이 면적 단위에서만 이루어지면서 해안사구 시스템에 영향을 줄 수 있는 방풍림의 수고, 식재 간격, 성장률, 번식률, 관광객 수 등의 변수들을 반영하지 못하여 실제 데이터와 시뮬레이션 데이터 간의 차이가 미흡한 것으로 나타났다. 따라서 추후 연구에서는 위 변수를 활용하여 보다 복합적인 시스템 분석이 이루어져야 할 것이다. 특히 방풍림 벌채에 따른 생태환경 변화 및 수용력 등에 대한 이해를 바탕으로 분석이 이루어져야 될 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 향후 해안지역 관리 및 해안사구 면적 유지, 보호를 위한 가이드라인을 마련함에 있어 방풍림 관리 분야에 기여 할 수 있을 것이다.

## 【참고문헌】

- 명현호. (2010). 「건강성 평가를 통한 해안사구 생태계 보전 · 관리방안 연구」. 박사학위논문, 목포대학교 대학원, pp.217-224.
- 박종철 · 안대희. (2014). “생태관광 방문객의 지각된 위험이 신뢰 및 만족, 재방문의도에 미치는 영향: 순천만 생태관광지를 중심으로”, 『관광연구저널』, 제28권 제2호, pp.80-87.
- 산림청. (2006). 「해안 방재림 조성 · 보전 · 관리방안에 관한 연구」. 산림청. pp.4-7.
- 서종철. (2002). “원격탐사와 GIS 기법을 이용한 신두 해안사구지대의 지형변화 분석”, 『한국지리지리학회지』, 제8권 제1호, pp.98-109.
- 석영선 · 송기환 · 진진형. (2014). “해안사구의 토지이용과 경관가치에 대한 시스템 사고”, 『한국 시스템다이나믹스 연구』, 제15권 제3호, pp.81-104.
- 이상문 · 최형석 · 박창석 · 주신하 · 신지훈. (2007). “자연경관 보전 및 관리를 위한 제도적 접근”, 『농촌계획』, 제13권 제3호, pp.23-26.
- 장동호 · 박지훈. (2010). “충남 연안 생태네트워크 구축을 위한 해안지형 평가”, 『한국사진지리학회지』, 제19권 제1호, pp.74-75.
- 전근우 · 김석우 · 김경남 · 중도행희 · 강기차부. (2005). “쓰나미에 대비한 해안림 조성과 비구조물 대책: 일본의 사례를 중심으로”, 『한국임학회』, 제94권 제3호, pp.197-198.
- 조광우 · 맹준호 · 주용준 · 신현화 · 김규한. (2006). 「해안개발사업에 따른 해안침식 영향 저감방안 연구」. 한국환경정책평가연구원. pp.53-69.
- 최지연. (2005). “신두리 해안사구를 둘러싼 갈등분석”. 『해양수산』, 제246호, pp.5-8.
- 해양수산부. (2003). 「신두리 사구해역 생태계보전지역 관리계획」. 해양수산부. pp.1-62.
- 환경부. (2011). 「자연방파제 해안사구」. 인천: 국립환경과학원.
- 「국립공원관리공단」. (2012). “태안해안국립공원, 해안선이 변하고 있다”. 8월 14일자.
- 「에코타임스」. (2012). “인공조성 ‘해안사구’ 효과 없다”. 9월 27일자.
- 「연합뉴스」. (2014). “모래서 자라는 미기록 버섯 2종 국내 첫 발견”. 8월 11일자.
- 「SBS뉴스」. (2014). “천연기념물 사구에 관광통로...홍물 전략”. 12월 20일자.
- 「JTBC뉴스」. (2012). “억지로 나무 심었더니...해안선 잡아 먹는 '괴물 방풍림'”. 11월 16일자.
- Bellhouse, D. R. (1981). “Area Estimation by Point-Counting Techniques”, Journal of Biometrics, Vol.37, No.2, pp.303-304.

- Bressolier, C. F. and Y. Thomas. (1977). "Studies on wind and plant interactions on French Atlantic coastal dunes". *Journal of Sediment Petrology*, Vol.47, No.1, pp.331-333.
- Carter, R. (1991). "Near-Future Sea Level Impacts on Coastal Dune Landscapes", *Landscape Ecology*, Vol.6, No.1-2, pp.29.
- García-Mora, M., J. Gallego-Fernández and F. García-Novo. (2000). "Plant Diversity as a Suitable Tool for Coastal Dune Vulnerability Assessment", *Journal of Coastal Research*, Vol.16, No.4, pp.990-993.
- Martinez, M. L. and N. P. Psuty. (2004) "Coastal Dunes: Ecology and Conservation". Berlin: Springer. pp.2-64.
- Nordstrom, K. F., K. Nordstrom, N. Psuty, and R. W. G. Carter. (1990). *Coastal dunes: form and process*. New York: Wiley. pp.1-38.
- UNEP. (1995). "Guidelines for Integrated Management of Coastal and Marine Areas With Special Reference to the Mediterranean Basin", Split, Croatia: UNEP. pp 80.
- Williams, A., J. Alveirinho-Dias, F. García Novo, M. Garcia-Mora, R. Curr and A. Pereira. (2001). "Integrated Coastal Dune Management: Checklists", *Continental Shelf Research*, Vol.21, No.18, pp.1937-1938.

▶ 접수일 : 2015. 3. 31. / 수정일 : 2015. 4. 28. / 게재확정일 : 2015. 4. 30.

**【 부록 】 신두리 해안지역 토지이용 변화에 대한 기본 모형의 수식**

〈표 4〉 토지이용 면적 변화 모형정립

변수명	관계식	함수유형	단위
sand_dune	$sand\_dune(t) = sand\_dune(t - dt) + (w\_to\_s + d\_to\_s + e\_to\_s - s\_to\_w - s\_to\_d - s\_to\_e) * dt$	수준변수	m <sup>2</sup>
INIT sand_dune	1239550		m <sup>2</sup>
development	$development(t) = development(t - dt) + (s\_to\_d + e\_to\_d + w\_to\_d - d\_to\_s - d\_to\_e - d\_to\_w) * dt$	수준변수	m <sup>2</sup>
INIT development	962025		m <sup>2</sup>
windbreak	$windbreak(t) = windbreak(t - dt) + (s\_to\_w + e\_to\_w + d\_to\_w - w\_to\_s - w\_to\_e - w\_to\_d) * dt$	수준변수	m <sup>2</sup>
INIT windbreak	792900		m <sup>2</sup>
etc	$etc(t) = etc(t - dt) + (s\_to\_e + w\_to\_e + d\_to\_e - e\_to\_s - e\_to\_w - e\_to\_d) * dt$	수준변수	m <sup>2</sup>
INIT etc	32625		m <sup>2</sup>
s to d (사구→개발)	IF(TIME<2007) THEN (sand_dune*s_to_d_r1) ELSE(sand_dune*s_to_d_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
s to w (사구→방풍림)	IF(TIME<2007) THEN (sand_dune*s_to_w_r1) ELSE(sand_dune*s_to_w_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
s to e (사구→기타)	IF(TIME<2007) THEN (sand_dune*s_to_e_r1) ELSE(sand_dune*s_to_e_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
d to s (개발→사구)	IF(TIME<2007) THEN (development*d_to_s_r1) ELSE(development*d_to_s_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
d to w (개발→방풍림)	IF(TIME<2007) THEN (development*d_to_w_r1) ELSE(development*d_to_w_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
d to e (개발→기타)	IF(TIME<2007) THEN (development*d_to_e_r1) ELSE(development*d_to_e_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
w to s (방풍림→사구)	IF(TIME<2007) THEN (windbreak*w_to_s_r1) ELSE(windbreak*w_to_s_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
w to d (방풍림→개발)	IF(TIME<2007) THEN (windbreak*w_to_d_r1) ELSE(windbreak*w_to_d_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year

w to e (방풍림→기타)	IF(TIME<2007) THEN (windbreak*w_to_e_r1) ELSE(windbreak*w_to_e_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
e to s (기타→사구)	IF(TIME<2007) THEN (etc*e_to_s_r1) ELSE(etc*e_to_s_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
e to d (기타→개발)	IF(TIME<2007) THEN (etc*e_to_d_r1) ELSE(etc*e_to_d_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
e to w (기타→방풍림)	IF(TIME<2007) THEN (etc*e_to_w_r1) ELSE(etc*e_to_w_r2)	변화율변수	m <sup>2</sup> /year
s to d r1	2007년 이전의 사구→개발 면적 증가율(0.003890425)	보조변수	상수
s to d r2	2007년 이후의 사구→개발 면적 증가율(0.042699178)	보조변수	상수
s to w r1	2007년 이전의 사구→방풍림 면적 증가율(0.000589618)	보조변수	상수
s to w r2	2007년 이후의 사구→방풍림 면적 증가율(0.108633344)	보조변수	상수
s to e r1	2007년 이전의 사구→기타 면적 증가율(0)	보조변수	상수
s to e r2	2007년 이후의 사구→기타 면적 증가율(0.000084053)	보조변수	상수
d to s r1	2007년 이전의 개발→사구 면적 증가율(0.012654818)	보조변수	상수
d to s r2	2007년 이후의 개발→사구 면적 증가율(0.063671824)	보조변수	상수
d to w r1	2007년 이전의 개발→방풍림 면적 증가율(0.002859266)	보조변수	상수
d to w r2	2007년 이후의 개발→방풍림 면적 증가율(0.061234415)	보조변수	상수
d to e r1	2007년 이전의 개발→기타 면적 증가율(0.000468202)	보조변수	상수
d to e r2	2007년 이후의 개발→기타 면적 증가율(0.002525156)	보조변수	상수
w to s r1	2007년 이전의 방풍림→사구 면적 증가율(0.001848161)	보조변수	상수
w to s r2	2007년 이후의 방풍림→사구 면적 증가율(0.039139159)	보조변수	상수
w to d r1	2007년 이전의 방풍림→개발 면적 증가율(0.002305982)	보조변수	상수
w to d r2	2007년 이후의 방풍림→개발 면적 증가율(0.02225)	보조변수	상수
w to e r1	2007년 이전의 방풍림→기타 면적 증가율(0)	보조변수	상수
w to e r2	2007년 이후의 방풍림→기타 면적 증가율(0.000217169)	보조변수	상수
e to s r1	2007년 이전의 기타→사구 면적 증가율(0.014677451)	보조변수	상수
e to s r2	2007년 이후의 기타→사구 면적 증가율(0.068063517)	보조변수	상수
e to d r1	2007년 이전의 기타→개발 면적 증가율(0.186829727)	보조변수	상수
e to d r2	2007년 이후의 기타→개발 면적 증가율(0.005461973)	보조변수	상수
e to w r1	2007년 이전의 기타→방풍림 면적 증가율(0.001401537)	보조변수	상수
e to w r2	2007년 이후의 기타→방풍림 면적 증가율(0)	보조변수	상수