

# 연안 및 하구 생태복원 대상지 선정기준 마련 전문가 워크숍

일 시 : 2015. 7. 24(금), 15:00~17:00

장 소 : 한국철도공사(대전역동광장) ITX새마을실

주최 · 주관 : 충남연구원

# 연안 및 하구생태복원 대상지 선정기준 마련 전문가 워크숍 개최계획(안)

## 1 개 요

- 일 시 : 2015년 7월 24일(금) 15:00~17:00
- 장 소 : 한국철도공사(대전역동광장) ITX새마을실

## 2 내 용

- 발제자
  - 【 제1주제 - 서울대학교 해양연구소 권봉오 박사 】  
연안 및 하구생태복원 대상지 선정기준 해외사례
  - 【 제2주제 - 국립환경과학원 자연환경연구과 최광희 박사 】  
자연의 순환에 기반을 둔 해안사구 보전 및 복원방안
- 토론자
  - 대전대학교 토목공학과 허재영 교수(좌장)
  - 전남대학교 지구환경과학부 전승수 교수
  - 한국환경정책평가연구원 정책연구본부 김충기 박사
  - 안양대학교 해양바이오시스템공학부 류종성 교수
  - 충남연구원 기획조정연구실 이상진 실장
  - 충남연구원 서해안기후환경연구소 최진하 소장

## 3 추진계획

시 간		내 용	비 고
15:00~15:10	10'	참석자 및 행사일정 소개	사회자
15:10~16:00	50'	주제발표(2건)	발표자
16:00~16:50	50'	종합토론	토론자/참석자
16:50~17:00	10'	정리	사회자

**연안 및 하구생태복원  
대상지 선정기준 해외사례**

**서울대학교 해양연구소 권봉오 박사**



## 연안 및 하구생태복원 대상지 선정기준 해외사례

권봉오, 김종성  
서울대 지구환경과학부 및 해양연구소

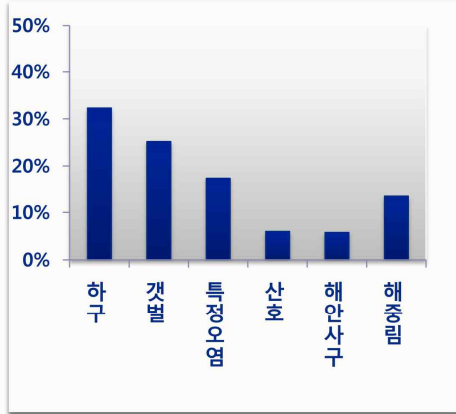


### 1. 해양생태계 복원 기획 연구소개

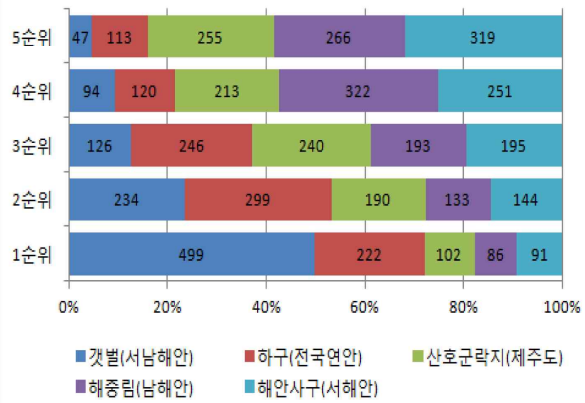


## 1.1. 기술수준 분석 - 복원 대상지 선호도 분석

### 복원 대상지 선호도 조사



해양생태복원 서식지 선호도 전문가 조사, n=26



해양생태계 관리에 대한 국민의견 조사, n=1,000

- 전문가 조사 결과 **해양생태복원 우선순위는 하구**가 가장 높은 것으로 조사됨
- 대국민 설문조사 결과 **우선순위는 갯벌**이 가장 높은 것으로 나타남.
- 두 조사 모두 하구 및 갯벌이 선호도의 60% 정도를 차지한 것으로 나타나 **하구 또는 갯벌의 복원이 상대적으로 중요함**을 시사함.

## 1.2. 해양생태계 복원 기술트리



### 1.3. 중점추진분야별 연구개발 로드맵 - 복원여부 사전진단

복원  
기술  
트릭

대분야  
중분야  
요소기술

분야		복원여부 사전 진단								트리	요소기술
단계		1단계			2단계				3단계		
기간		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
기간별 주요 목표		• 일반 해양환경기준 설정 • 생물다양성 분석기술 • 해양 바이오롬 설계			• 해역별 해양환경기준 설정 • 바이오롬 이용 생태계 구조/기능 분석 • 해수순환과 생태계 예측 모델링 기술 • 생태계 지표 개발 • 고유종, 보호대상해양생물 관리기술 • 서식지 분류와 보호지역 선정과 관리				• 용도별 해양환경기준 설정 • 장기생태계 변동 분석 및 예측 • 실시간 생태 정보 획득기술 • 자연력 이용 생태계 기능개선 • 생태계 보존/훼손 복원기술 • 해양생물/생태 정보서비스		
핵심기술	기준 설정	• 물리/지형 기반 해역구분 • 해수/퇴적물 기준 • 생태계 기준			• 생태계 기반 해역구분 • 해역별 해양환경기준 설정 • 해양보호구역 지정기준 • 군집안정성 평가				• 용도별 해양환경기준 설정		
	관측 및 예측	• 해양생태계 구조 분석 • 해양/갯벌 생산 및 분해기능 • 야생동물/해양포유류 조사 • 오염물질 분석/노출평가 기술			• 생태계 구조 변화 예측 모델 • 보호대상종 선정기술 • 퇴적물 거동 및 침식/퇴적 • 해양환경 요인과 생물량 변동 측정 자동화				• 실시간 생물정보 획득 기술 • 해양생태계 변화 예측 모델 • 해양생물다양성 보존 관리 및 생물지리변동 예측		
	의사결정	• 생태계 건강성 판정기법			• 생태계 별 생태지표 확립 • 생태등급도 구축				• 해양생태계 건강성판정 종합 시스템구축		
연구개발전략		• MT/BT/IT 융합기술개발 • 국제협력 • 기관간 연구협력 및 DB 공유 • 감시/감지기술 개발			• MT/BT/IT 융합기술개발 • 국제협력 • 기관간 연구협력 및 DB 공유 • 서식지변동 3D 재현기술 개발				• 지역특화 생태계 모델 • 생물모니터링 실시간 네트워크 운영 • 생물/물리/공학 융합기술		
주정 예산		• 51억원/년			• 87억원/년				• 115억원/년		
관련법규/계획		• 해양생태계의 보존 및 관리에 관한 법률, 습지보전법, 해양환경관리법, 수산자원관리법, 연안관리법, 하천법 • 해양생태계보전관리기본계획, 해양환경관리종합계획, 환경관리예의 관리기본계획, 2020 해양과학기술 로드맵									

### 1.4. 서식지별 복원사업 계획 - 하구 생태계

#### 하구생태계 복원사업

단계		1단계			2단계				3단계		
기간		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
기간별 주요 목표		• 우선 복원대상 하구 선정 • 대규모 인공하구 순환 개선 • 소규모 인공하구 복원 • 자연하구 복원			• 대규모 인공하구 순환 개선 • 소규모 인공하구 복원 • 자연하구 복원				• 대규모 인공하구 순환 개선 • 소규모 인공하구 복원 • 자연하구 복원		
사업 내용	대규모 인공 하구 순환개선	• 우선 복원대상 하구 선정 • 하구독 기능 재평가 • 대조하구 설정 및 모니터링 • 하구수문 운영 개선방안 도출			• 하구 서식지 복원계획 수립 • 대조하구 모니터링 • 하구순환 개선사업 시행 • 하구서식지 복원사업 시행 • 복원 평가방법 개발/사후 모니터링				• 사후모니터링 및 복원 평가 • 복원생태계 생태/사회경제 기능 평가 • 대조하구 모니터링 • 비용/편의 평가		
	소규모 인공 하구 복원	• 우선 복원대상 하구 선정 • 인공구조물 기능 재평가 • 하구생태계 훼손 실태조사 • 대조하구 설정 및 모니터링			• 하구생태계 복원계획 수립 • 대조하구 설정 및 모니터링 • 인공구조물 제거 및 하구서식지 복원사업 • 복원 평가방법 개발/사후 모니터링				• 사후모니터링 및 복원평가 • 복원생태계 생태/사회경제 기능 평가 • 대조하구 모니터링 • 비용/편의 평가		
	자연하구 복원	• 우선 복원대상 하구 선정 • 생태계 훼손 실태조사 • 대조하구 설정 및 모니터링			• 하구생태계 복원계획 수립 • 대조하구 설정 및 모니터링 • 하구서식지 복원사업 시행 • 복원 평가방법 개발/사후 모니터링				• 사후모니터링 및 복원평가 • 복원생태계 생태/사회경제 기능 평가 • 대조하구 모니터링 • 비용/편의 평가		
	주정 예산	• 100억원/3년			• 550억원/4년				• 150억원/3년		

## 1.5. 타당성 분석결과

### 정책적 타당성

1. 국제사회는 경제상황 악화와 에너지 위기를 극복하기 위한 대안으로 UNEP 중심으로 녹색경제 체제 구축을 추진중
2. 해양생태계 복원 연구개발 추진계획은 국제사회 녹색산업 성장에 대응되며, 해양의 잠재력을 극대화 하는데 기여할 수 있음
3. 상위계획과 부합하고 사업추진의지가 형성되어 있음
  - 공공이익을 극대화하는 과정에서 시장을 창출하게 되므로 초기에 정부 지원이 필수적임
  - 자원확보의 한계, 사업 중복성 등의 위험요인은 극복 가능함

• 정책적 타당성 확보됨

### 기술적 타당성

1. 해양생태계 복원은 '기술개발' 과 '복원 사업 시행' 이라는 두 축으로 수행 되어야 성공가능성을 높일 수 있음
  - 진단-설계-개선-조성-관리의 5대 중점 추진 분야의 기술개발을 수행하면서, 동시에 서식지별 복원사업 추진해야함
2. 국내 복원기술 수준은 선진국 대비 40-70%이며 5년 후에는 60-80%로 향상될 것으로 예측됨
  - 선진국과의 기술격차를 현재 5-11년 앞서 5년 후에는 4-7년으로 줄일 수 있을 것으로 예상
3. 종합적인 해양생태계 복원계획을 수립 하고 이를 통해 효과적인 복원사업을 수행할 수 있음

• 기술개발 계획이 적절  
• 기술개발 성공가능성 높음  
• 기존사업과 연계 가능  
• 기술적 타당성 확보됨

### 경제적 타당성

1. 해양생태계 복원기술개발 및 복원사업 은 경제성이 있음
  - 총 비용의 현재가치: 803억원
  - 총 편익의 현재가치: 3199억원 추정
  - 순 현재가치: 2396억원
2. 편익-비용 비율은 3.98로 산정되어 1.0 을 초과함
3. 내부수익률은 54.8%로 사회적 할인율 5.5%를 초과함

(전국 1,000가구의 설문조사 결과)

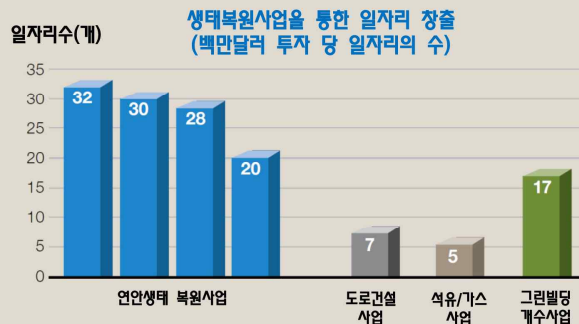
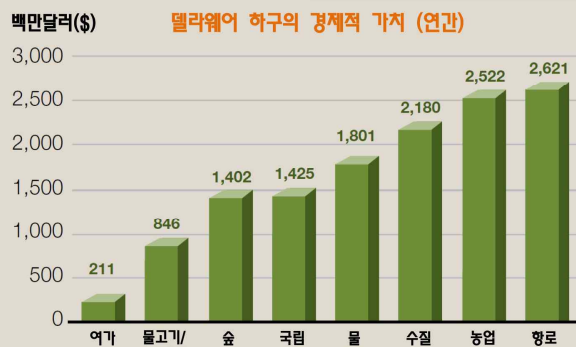
• 경제적 타당성 확보됨  
• 안정적인 예산을 확보하여 조속히 착수되어야 함

## 1.6 해양생태계 복원 기술개발 사업의 가치

### Jobs & Dollars

BIG RETURNS from coastal habitat restoration

### 연안생태계의 경제적 가치 미국사례



### 미국 연안지역의 경제 기여도

- 75%의 어업과 80~90%의 낚시 여가활동의 장소
- 전체 미국 고용의 40% 차지
- 6,900만개 이상의 일자리 제공
- 국가 GDP의 절반 정도를 생산
- 매년 2조 달러의 교역이 일어남



**“사냥과 낚시는 매년 약 800억 달러 규모의 사업이다. 이것은 곧 연안복원 사업에의 투자는 곧 우리나라 경제에 투자임을 의미한다.”**

— Dale Hall (Ducks Unlimited 대표)



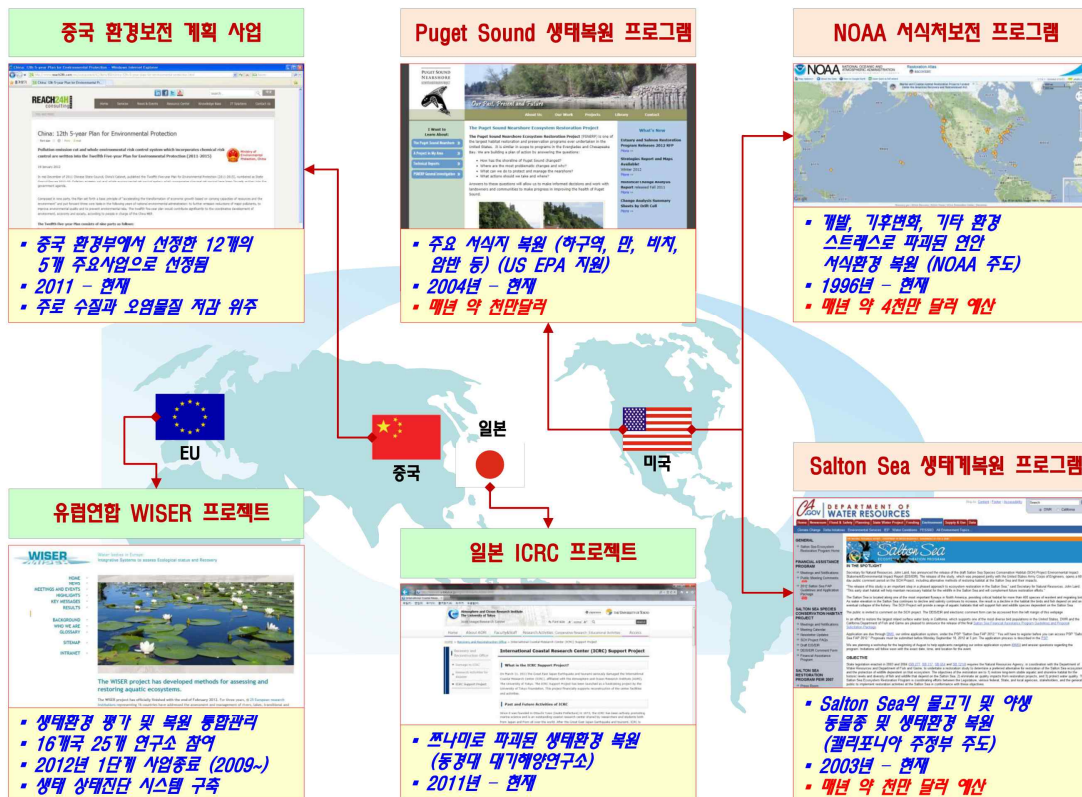
## 2. 연안생태계 복원 대표사례 분석

### 2.1. 국외 사례

### 2.2. 국내 사례

### 2.3. 요약 및 시사점

### 2.1. 국외 사례 [1/5] – 주요국 연안생태복원 대표 프로그램(프로젝트)



## 2.1. 국외 사례 [2/5] – 미국 최대규모 하구복원 사례



### 식재 및 서식지 복원

지역	미국, 체사피크만
기간	1983년-
타겟	하구의 복원
참고	Chesapeake Bay Program, 2012

#### 복원지역중요성

- 복원 최대규모 하구역
- 3,700종 생물 서식지
- 수산업, 관광산업
- 지역사회 전통/문화

#### 복원배경

- 대기오염, 수질오염
- 적조
- 서식지 및 먹이망 훼손
- 물고기 폐사

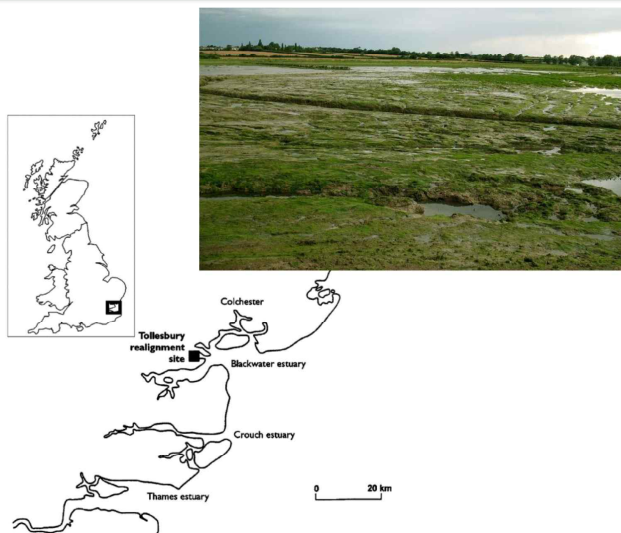
#### 복원방법

- 해조지(잘피) 식재
- 굴 암초 복원
- 어도 복원
- 습지 복원

#### 복원결과

- 오염저감
- 생태계 회복 중

## 2.1. 국외 사례 [3/5] – 영국의 최초 습지복원 사례



### 해수유통

지역	영국, 에섹스 Blackwater 하구
기간	1995년-2007년
타겟	갯벌의 복원
참고	Reading et al., 2008

#### 복원지역중요성

- 염습지 조성을 통해 자연방어를 만들어 침식 예방 필요성 대두

#### 복원배경

- 연안방재용 제방의 건설로 조간대 서식지 소실

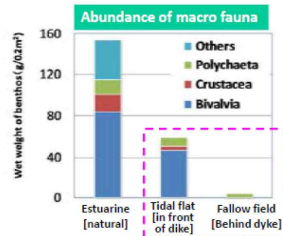
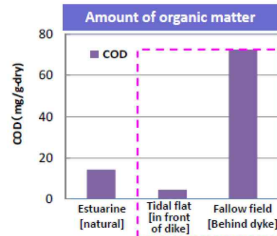
#### 복원방법

- 제방의 일부(60m)를 제거하여 해수유통

#### 복원결과

- 제방제거로 침수된 지역에 염습지 식물 서식
- 무척추동물 출현
- 퇴적속도 감소

## 2.1. 국외 사례 [4/5] – 일본의 갯벌복원 대표사례



### 해수유통

지역 일본, Ago Bay

기간 2010년-2011년

타겟 갯벌의 복원

참고 Kokub et al., 2011

### 복원지역중요성

- 생물 **생산성**, **자연정화** 능력 증대를 위해 필수

### 복원배경

- 100년 이상 지속된 진주양식과 도시 하수, 토지 **간척** 때문에 자연정화능력이 감소

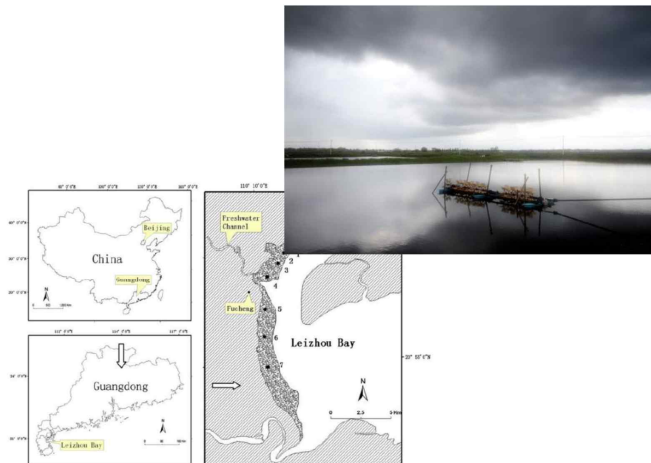
### 복원방법

- 간척사업 때문에 닫혀있던 수문을 개방함으로 **해수 교환** 시킴

### 복원결과

- 복원 후 **생물다양성 증가**
- COD 값 낮아짐

## 2.1. 국외 사례 [5/5] – 중국의 습지복원 대표사례



### 식재

지역 중국, 레이조우 만

기간 1980년-2005년

타겟 갯벌의 복원

참고 Ren et al., 2008

### 복원지역중요성

- 맹그로브**는 해안선 유지, 풍부한 연안수, 벌목 등 생태계서비스 가치가 높은 독특한 생태계를 제공

### 복원배경

- 관개, **간척**, **새우양식** 등의 인간활동에 의해 맹그로브 서식지 파괴

### 복원방법

- 고유종 및 외래종 **맹그로브 이식**

### 복원결과

- 외래종이 이식된 지 **10년 후**, **자연상태**와 유사해짐



## 2.2. 국내 사례 [1/2] – 고창 갯벌 복원



고창갯벌 생태계복원사업계획도  
S=13,000



### 국내 대표 사례-I (71억)

지역	한국, 전북 고창군
기간	2010년-2013년
타겟	갯벌 염습지 복원-폐양식장
참고	갯벌복원을 위한 기술지침 및 계획수립, 2010 등

#### 복원지역중요성

- 관광가치가 높은 갯벌

#### 복원내용

- 폐양식장으로 사용하던 곳을 갯벌로 복원하고 염습지를 조성하여 생태공원화 함

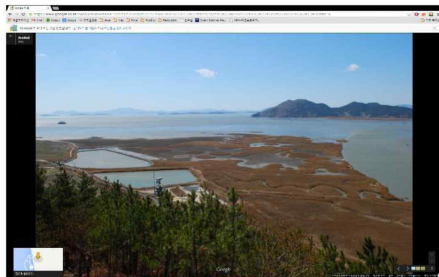
#### 문제점

- 복원개념이 아닌 **해수차단 방식**으로 시공
- 사업 진행시 **모니터링 미수행**

#### 복원방법

- 제방축조(7,516m)
- 배수감문 5개소 설치
- 염습지 2개소 설치
- 염생식물/갈대군락지 조성

## 2.2. 국내 사례 [2/2] – 순천만 갯벌 복원



### 국내 대표 사례-II (26억)

지역	한국, 전남 순천시
기간	2010년-2012년
타겟	순천만 하구갯벌의 복원
참고	갯벌복원을 위한 기술지침 및 계획수립, 2010 등

#### 복원지역중요성

- 습지보호구역으로 지정 되었을 뿐 아니라 2006년 람사르 습지에도 등록

#### 복원내용

- 순천만의 전체적인 생태보전을 위해 훼손된 **폐염전** 및 **새우양식장** 복원

#### 문제점

- 산책로 조성으로 **물새류 서식지 위협**
- 콘크리트 제방의 비환경적 노출로 인한 **균열 발생**

#### 복원방법

- 석축쌓기** 및 **갯골** 조성
- 조경 및 **테크** 설치

## 2.3. 요약 및 시사점 – 국내외 복원사업의 배경 및 결과 분석

국 가	겟 별		하 구	
	복원 배경	복원 결과	복원 배경	복원 결과
미 국	제방 건설	생물군집 회복	준설	생물개체수 증가
	기름 유출	유류오염 저감	허리케인	습지서식지 복원
유 럽	제방 건설	저서생물 증가	하구개발	습지식물 증가
	폐수 배출	생물량 증가		
일 본	토지 간척	생물다양성 증가	도시화	생물군집 복원
			농업 발달	
중 국	관개, 간척	서식지 복원	화학산업 오염	오염물질 제거
한 국	제방/하구둑 건설	수질 개선	연륙도로	해수 유통
	산업단지/폐양식장		폐염전	

## 3. 국외사례 심층 분석 [9 pages]

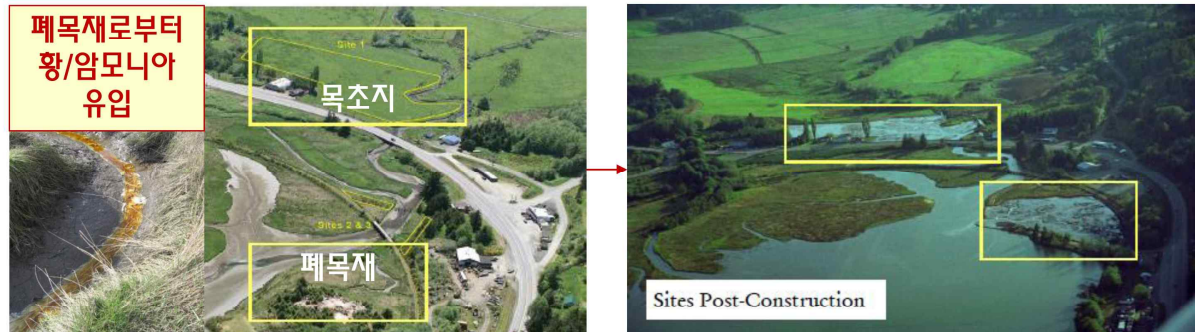
3.1. 소규모 – Salmon Creek 하구 복원 [4]

3.2. 대규모 – Nisqually 하구 복원 [5]



### 3.1. 소규모 [1/4] – 미국 Salmon Creek 하구 복원

#### 사업 개요



프로그램/기간

미국 Salmon Creek 하구복원/2008년

타겟

하구/염습지 복원, 수질 개선

예산/면적

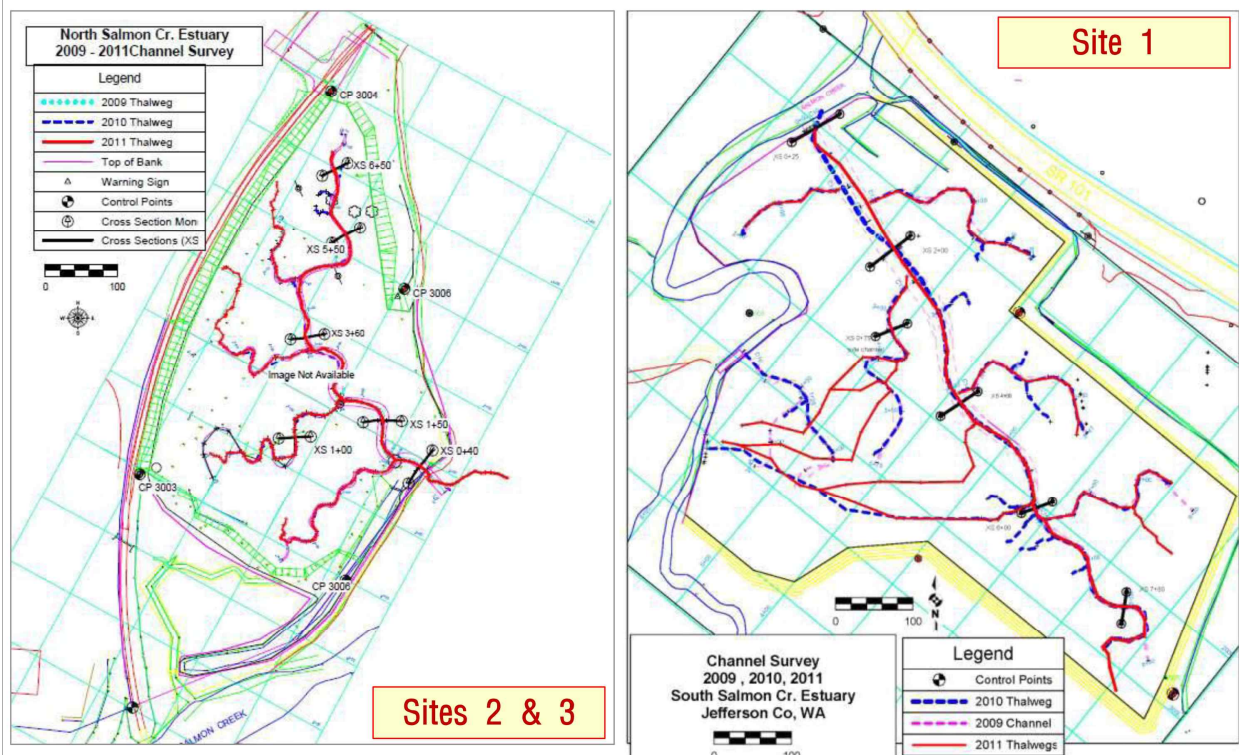
16억원(2008년)/4.4 ha

복원기술/결과

폐목재 제거, 물길(5.2 km) 복원, 연어 복원, 어류 산란장 제공 등

### 3.1. 소규모 [2/4] – 미국 Salmon Creek 하구 복원

#### 복원 현황도



### 3.1. 소규모 [3/4] – 미국 Salmon Creek 하구 복원

#### 시공 과정 (Sites 2 & 3)

##### 1. 사전조사(조위측정)



##### 2. 폐목재 제거



##### 3. 수로 공사(I)



##### 4. 수로 공사(II)



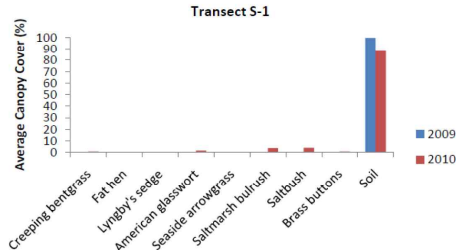
##### 5. 해수 유통



##### 6. 복원 후 모습

### 3.1. 소규모 [4/4] – 미국 Salmon Creek 하구 복원

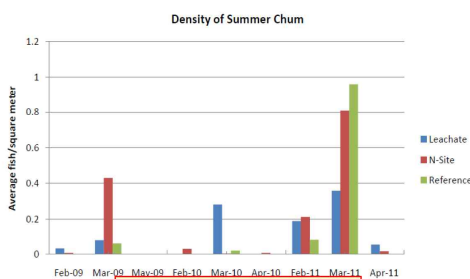
#### 사후 모니터링



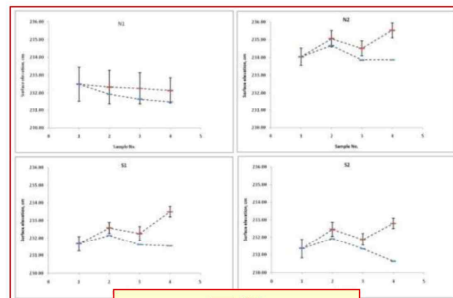
##### 식생/토양



##### 조수로(물길복원)



##### 어류



##### 조위



### 3.2. 대규모 [1/5] – 미국 Nisqually 하구 복원

#### 사업 개요



**프로그램/기간** 미국 Nisqually 하구 복원/1997-2009년

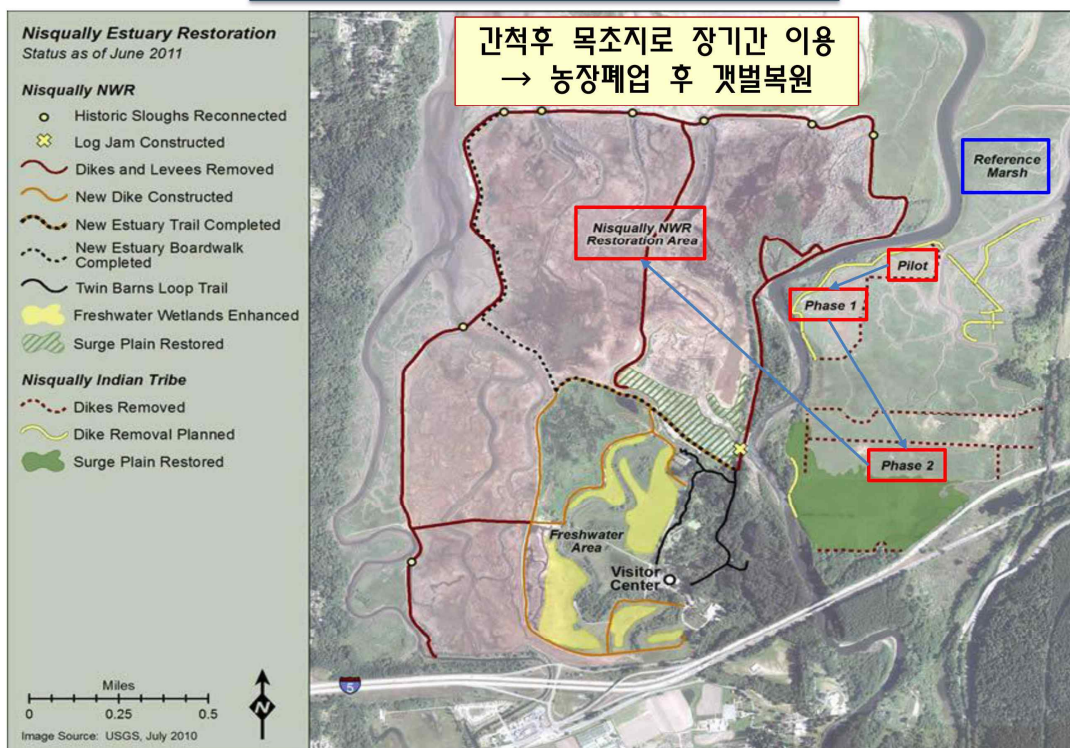
**타겟** 하구/삼각주 복원, 해수유통

**예산/면적** 130억원(2009년)/308 ha

**복원기술/결과** 방조제 제거(해수유통)/ 습지 증가

### 3.2. 대규모 [2/5] – 미국 Nisqually 하구 복원

#### 복원 현황도



### 3.2. 대규모 [3/5] – 미국 Nisqually 하구 복원

#### 시공 과정

##### 1. 방조제 일부 제거



##### 2. 방조제 구조물 제거



##### 3. 수로 공사



##### 4. 내부 공사



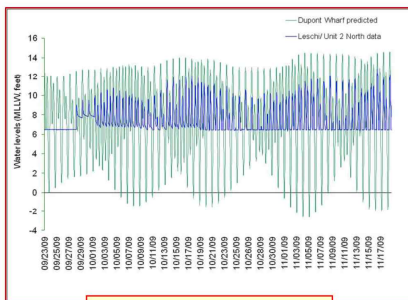
##### 5. 방조제 완전 철거



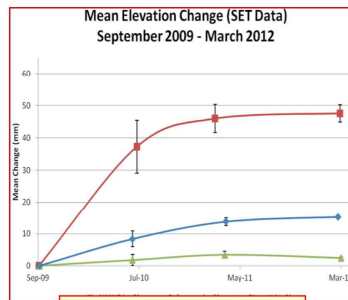
##### 6. 해수 유통

### 3.2. 대규모 [4/5] – 미국 Nisqually 하구 복원

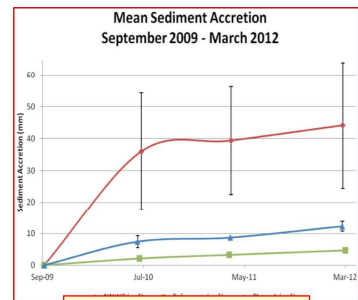
#### 사후 모니터링



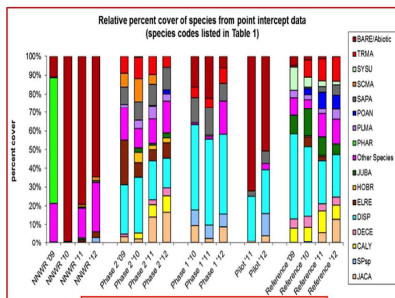
##### 조석



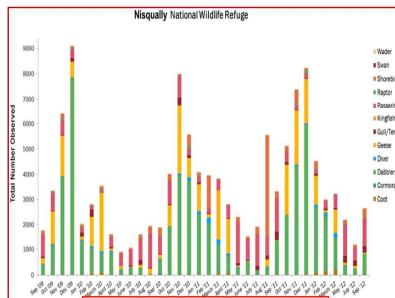
##### 고도



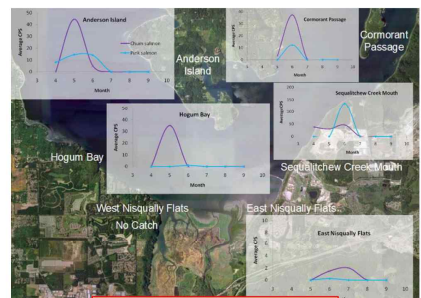
##### 퇴적물



##### 식생



##### 조류



##### 어류



### 3.2. 대규모 [5/5] – 미국 Nisqually 하구 복원

#### 복원 전후 생태계 변화

Removal



## 4. 연안 및 하구복원대상지 선정기준

6.1. 복원지 선정 및 평가기준-국외사례

6.2. 복원지 사후 평가 기준

#### 4.1. 복원지 선정 및 평가기준 – 국외사례

##### Prioritizing Ecosystem, Species, and Sites for Restoration

복원대상 생태계 우선순위 결정시 생태계 희귀성, 종조성 특성(풍부도, 고유종 여부 등), 훼손 정도 등의 기준을 사용할 수 있지만, 아래 3가지 사항 고려할 것을 제안

- 인간 활동 때문에 나타나는 생태계 면적 감소 또는 상태 악화의 정도
- 복원대상 생태계를 둘러싸고 있는 더 큰 규모의 생태계에서 일어나는 생태적 과정 (지구탄소순환, 지역적 규모의 교란 또는 수문조건, 영양염류 이동 등)에 복원대상 생태계가 기여하는 정도
- 추가 훼손 위험도(훼손 정도가 생태계의 회복력을 초과해 바람직하지 않은 새로운 상태로 변화할 수 있는 위험성)

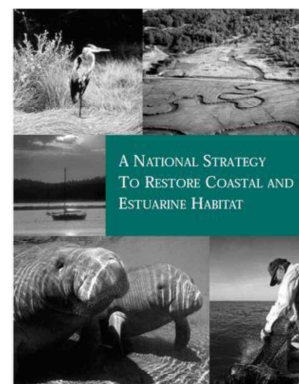
Noss et al. (2009)

#### 4.1. 복원지 선정 및 평가기준 – 국외사례

##### 미국 연안하구생태계 복원 국가전략

미국 연안하구생태계 복원 국가전략에서 5가지 기준 제시하며, 우선복원대상 서식지 유형과 위치를 명시할 것을 권고하였음

- 복원사업의 시급성(서식지 희귀성, 생물종이나 서식지에 대한 위협)
- 서식지나 생물종이 제공하는 생태적 편익
- 서식지나 생물종을 성공적으로 복원할 가능성
- 서식지나 생물종 복원에 대한 대중적 지지
- 서식지나 생물종이 제공하는 사회적 · 경제적 편익



Restore America's Estuaries (2000)

#### 4.1. 복원지 선정 및 평가기준 – 국외사례

##### 미국 Lower Columbia River Estuary

미국 Lower Columbia River Estuary에서 복원 우선순위를 결정하는데 활용할 수 있는 복원 우선순위 평가체계(Restoration Prioritization Framework)를 제안

- 이 평가체계는 **두 단계 접근법**을 채택
- 첫 번째 단계(Tier I)에서는 GIS를 이용하여 제방 축조, 농업, 수상구조물, 물 흐름 제한구조물 등 **다양한 인위적 요소**의 영향을 평가하며, 이외에도 수문 연결성, 기존 기능에 관한 정보도 분석함
- 두 번째 단계(Tier II)에서는 **복원비용**, 기대되는 **기능적 변화**, **복원장소의 크기**, 복원사업의 **성공확률** 예측값 등에 관한 자료를 바탕으로 구체적인 복원사업 제안서의 우선순위를 평가함

Evans et al. (2006)

#### 4.1. 복원지 선정 및 평가기준 – 국외사례

##### 미국 Peconic Estuary 서식지 복원

범주 및 지표	점수	내 용
<b>생태적 요소</b>	<b>100</b>	
• 사라진 서식지의 가치	-30	멸종위기종/위협생물종/특별관심 대상생물 중
• 훼손 정도	30	심각/보통/낮음
• 과거의 서식지 유형	8	기록 유무 및 정도에 따라 3단계로 구분
• 복원사업의 규모	10	면적에 따라 4단계로 구분
• 서식지 인접성/토지이용	20	인접 정도에 따라 5단계로 구분
• 복원목표 기능	5	영양염 제거/중 다양성/지하수 보호/야생동물 이동통로
• 서식지다양성	6	다양성 증가에 기여/미기여
• 보호대상 생물 중	16	멸종위기종/위협생물종/특별관심 대상생물 중
• 보호구역 인접성	5	인접/미인접
<b>실행가능성 요소</b>	<b>100</b>	
• 복원대상지 소유권 형태	18	네 가지 유형으로 구분
• 관련 계획과의 연관성	10	연관성 유무의 두 가지 유형으로 구분
• 복원계획 수립 단계	17	진행 정도에 따라 세 가지 유형으로 구분
• 재원마련 정도	10	재원의 일부라도 확보 유무의 두 가지 유형으로 구분
• 복원사업 성공확률	25	세 단계로 구분
• 지역사회/이용자 지지도	5	확실한지지/반대 없음/확실한 반대의 세 가지 유형으로 구분
• 복원 후 유지관리 필요 정도	15	필요 없음/소규모 관리/대규모 관리의 세 단계로 구분
<b>공공·경제적 편익 요소</b>	<b>50</b>	
• 공공 접근성 및 인식 제고	10	접근성 제고/인식 제고의 두 가지 항목
• 상업 및 여가 이용 제고	20	이용 정도 및 영향에 따라 다섯 가지 유형으로 구분
• 상업 및 여가 이용 생물종 편익	20	2종 이상에 편익/1종에 편익/간접 편익 세 가지 유형으로 구분

PEP HRWG (2000)

## 4.2. 복원지 사후 평가기준 - 염습지 복원사업 평가지표의 예

### 미국 Galveston Bay 염습지 복원

범 주	지 표	내 용
경관/복원지역 특성	육지방향 이동에 대한 장애물	염습지 확장을 방해하는 장애물 수
	인공구조물	부두, 가설도로 등 인공구조물 수
수문 특성	심각한 변화	평균수면 이상의 독 비율
	보통 변화	평균수면 이하의 독 비율
야생동식물 서식지	식생 피도	50 m 조사선에서 방형구 조사
	식생 다양성	
	외래종	서식지 외 생물 종
	표서동물	지표종(고둥, 게)의 상대밀도
퇴적층 특성	토양안정도	토양경도계 이용 토양 경도 측정
	2~4cm 식물뿌리	토양 체질 후 상대 뿌리 비율 측정
	25~27cm 식물뿌리	
	공극수 염분	전도도 이용 측정
	공극수 pH	pH 미터 이용 측정

Staszak & Armitage (2013)

- Galveston Bay의 염습지 복원지역에 대한 신속평가방법(Rapid Assessment Method) 사용
- 네 가지 범주, 13개의 평가지표를 선정 후, 지표별로 0~4점의 점수를 부여
- 범주별로 점수를 종합하여 **생태계온전성지수(Index of Ecosystem Integrity)** 계산

## 5. 연안 및 하구생태복원 사업의 방향

### 5.1. 생태복원의 기본원칙

### 5.2. 제언



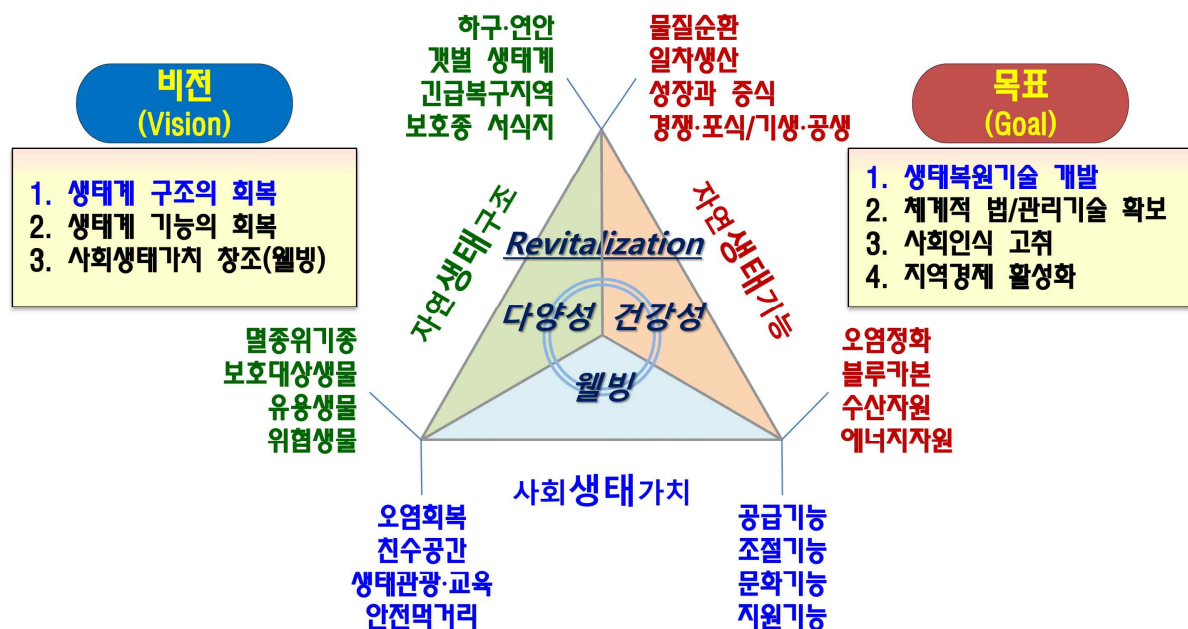
## 5.1. 생태복원의 기본 원칙 [1/2] – 뉴패러다임?

### ‘생태계’ 중심의 자연성 회복

	현재까지 (As Is)	미래 (To Be)
복원대상	생물종 중심 (구조 중심)	‘서식처’ 까지 확대 (생태계 기능회복 강조)
접근방법	기술적/행정적 접근 (조경중심의 공원화)	생태적 접근 요망 (생태기능 중심의 자연화)
시행주체	정부 (관주도)	정부, 기업, 대학, 연구소 (협업체 주도)
우선순위	기준이 모호 (사회적/정치적 이슈 위주)	기준요망 (복원의 객관적 우선순위 도출)
배경지식	개별학문 위주	융합학문 강화 (생태공학)
투자인식	훼손시킨 환경에 치러야하는 대가	세계선도 대형 복합산업 (전략사업화)
사후관리	평가부재/미비	평가체계 구축 (법제도 정비)

## 5.1. 생태복원의 기본 원칙 [2/2] – 생태계 서비스 확장성 제고!

### 생태복원의 비전 및 목표



## 5.2. 제언 – 복원지 선정 및 평가기준의 고찰

### ‘원칙’의 재정비

1

#### 적용적 관리(adaptive management)의 원칙

- 생태적 조건 및 사회경제적 여건의 변화를 반영하는 능동적 평가 요구됨

2

#### 생태계 복원 목적과 목표의 명확성

- 복원지 선정기준은 복원사업의 목적과 목표에 따라 달라져야 함

3

#### 생태적/사회경제적 기능을 적절히 나타내는 지표의 선정

- 생태계 과정을 증시하는 평가지표 선정으로 복원 성공가능성을 높여야 함

4

#### 평가를 위한 충분한 시간적 범위를 설정

- 단기, 중기, 장기의 세 범주로 구분하여 지표를 선정해야 함

5

#### 생태계 유형별 참조생태계(reference site)의 구조/기능 파악

- 복원시 원래 상태에 대한 정보가 필수적임, 복원 전략이 중요함

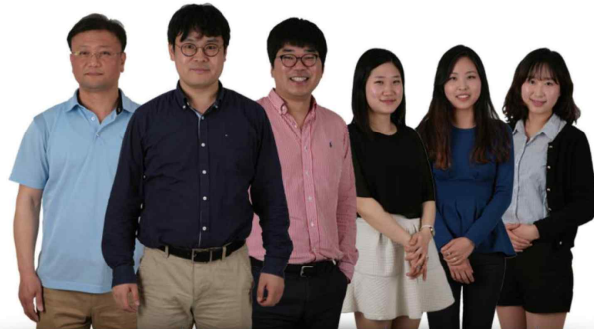
## 감사합니다

**BEntHOS Lab**

Biology, Environment and Human for Our Sea



Prof. Jong Seong Khim



Prof. Sung Joon Song

Dr. Seongjin Hong

Eun-Joo Lee

Research Assistant

Dr. Bong-Oh Kwon

Ji-Hyeon Shin

Research Assistant

Hye Yoon Yang

Research Assistant



Junsung Noh

Ph.D Course

Seonjin Kim

Ph.D Course

Junghyun Lee

Ph.D Course

Hanna Bae

M.S. student

Seungyeon Jeon

M.S. student

Chang-Keun Lee

M.S. student

Sejoon Yoo

M.S. student

Kim

SNU  
BEntHOS

# 연안 및 하구생태복원 대상지 선정기준 해외사례<sup>1)</sup>

권봉오, 김종성

서울대학교 지구환경과학부 및 해양연구소

## 1. 서론

- 지난 반세기 동안의 급속한 개발위주의 경제성장으로 한정된 연안공간에 대한 집중적인 개발이 지속되었음
- 지난 수 십 년간 지속된 공유수면 매립으로 해양생물 서식지를 완전히 파괴하는 결과를 초래하였고, 연안의 산업단지 조성 등을 통해 각종 육상기인 오염물질의 배출과 해양, 특히 연안역으로의 유입에 의해 해양생태계의 건강성이 악화되고 다양성이 훼손되었음
  - 한편, 무분별한 과잉어획이나 남획으로 인한 해양생태계의 기능도 악화되고 있는 현실임.
  - 국민소득 증가 및 연안 이용 활성화에 의해 향후 급속도로 늘어날 것으로 예상되는 해양생태계의 기능개선을 포함한 복원에 관한 충분한 대처나 관련 토지 이용에 대한 친환경적 접근 방식은 아직까지 구체화 되지 않은 상황임
- 해양생태계의 훼손 및 변화에 신속하게 대처하기 위해서는 해양환경 건강성을 진단하고 그 위해요소를 판별하는 기술과 해양생태계 복원을 위한 기술 개발이 시급한 실정임
  - 현재의 해양생태계 조사는 해양생물 중 다양성 중심으로 진행되고 있어, 해양생물 서식지에 대한 관심이 상대적으로 미약하나 선진국의 해양생태계 관리는 서식지 다양성 보존에 집중되고 있음
  - 해양생태계 복원과 관련된 국외연구는 미국, 일본, 네덜란드, 영국 등에서 활발하게 수행되고 있으며 현재 실용화 단계에 접어들었음. 국내 관련 기술은 아직 미약한 수준임
  - 국내에서는 2006년 이후 보호대상 해양생물종의 복원 및 보전을 위한 연구가 시작되었으나 현재까지도 모니터링 중심의 기초조사 수준에 머무르고 있음. 한편, 서식지 복원사업은 2008년부터 수행한 갯벌복원 기초사업 정도로 선진국에 비하면 초보적인 수준이라 하겠음
- 연안해양생태계의 가치는 육상생태계의 2배가량에 해당할 정도로 크고 갯벌, 하구역, 해조류,

1) 본 발제문은 해양생태계복원기술개발 기획연구 최종보고서(해양수산부, 2013)에서 발췌하여 수정 보완하였음을 밝혀둡니다.

산호초 등은 연안생태계의 가치에 큰 비중을 차지하고 있음

- 연안지역은 우리나라 인구의 약 30%, 국가산업단지의 약 80%를 점유하고 있다는 단편과 꾸준한 연안인구의 증가 전망에 따른 연안해양의 이용 확대라는 측면에서 매우 중요함. 따라서 고도로 밀집된 오랜 생태문화의 역사를 가진 연안역의 보존이 매우 중요하다고 하겠음
- 연안생태계의 생태적·사회경제적 잠재력을 유지하고 복원하는 것은 국가 경제의 지속성을 확보하기 위한 아주 중요한 토대임
- 그러나 연안생태계 복원에 투입할 수 있는 인적·물적 자원의 한계를 고려할 때 우선 복원해야 할 연안생태계 유형과 복원 대상지를 선정하는 기준과 절차, 복원사업을 시행하고 난 후 이 사업의 성공여부를 과학적으로 평가할 수 있는 기준과 절차는 연안생태계 복원사업에 투입하는 비용을 최소로 하고 복원사업으로부터 얻을 수 있는 편익을 극대화하는데 필수적인 선행 과제임
- 우리나라의 경우 연안생태계 유형별로 복원대상지의 우선순위 선정과 복원성공 여부 평가기준이 아직 체계적으로 정립되어 있지 않은 상태임
  - 갯벌 복원사업의 경우 지방자치단체가 제안하는 대상지를 국가 보전계획에 부합하는 지역인지 여부(습지보호지역 우선), 각 시군별 균형 분배, 훼손 연안생태계 유형별 균등 선정 등의 기준이 있음(국토해양부, 2009).
- 국내 연안생태계 복원사업의 추진과정에 필수적인 복원대상 사업지의 우선순위를 설정하고 복원사업 후 사업의 성공여부를 판단할 수 있는 평가체계의 개발 방향을 제시하기 위하여 연안생태계 복원이 활발하게 이루어지고 있는 선진국의 복원대상지 선정기준 및 복원 후 평가기준 관련 연구개발 동향을 살펴보았음.

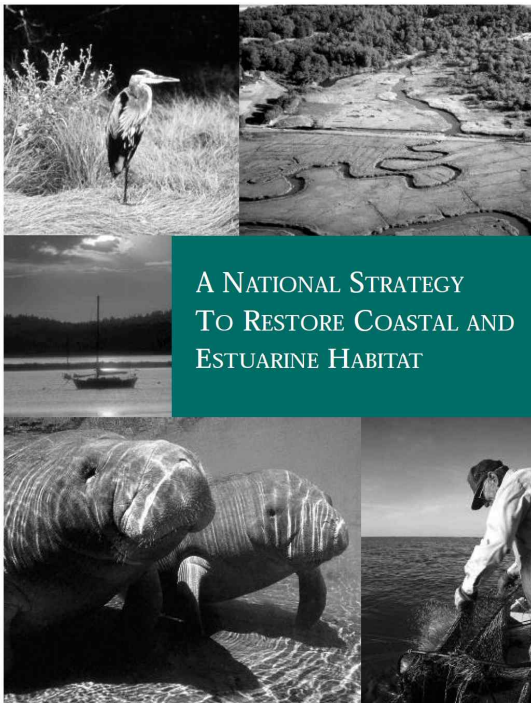
## 2. 연안 및 하구생태복원 대상지 선정기준 해외사례 분석

### 1) Prioritizing Ecosystems, Species, and Sites for Restoration

- ☐ Noss et al.(2009)은 복원대상 생태계의 우선순위를 결정하는데 회귀성, 종조성 특성(풍부도, 고유종 여부 등), 훼손위협 정도 등 보호대상 생태계의 우선순위 결정에 사용하는 기준을 적용할 수도 있지만, 더 바람직한 우선순위 설정 기준은 다음과 같은 세 가지 사항을 고려할 것을 제안하였음.
  - 인간 활동 때문에 나타나는 생태계 면적 감소 또는 상태 악화의 정도
  - 복원대상 생태계를 둘러싸고 있는 더 큰 규모의 생태계에서 일어나는 생태적 과정 (지구탄소순환, 지역적 규모의 교란 또는 수문조건, 영양염류 이동 등)에 복원대상 생태계가 기여하는 정도
  - 추가 훼손 위험도(훼손 정도가 생태계의 회복력을 초과해 바람직하지 않은 새로운 상태로 변화할 수 있는 위험성)

### 2) 미국 연안하구생태계 복원 국가전략

- ☐ 미국의 경우 ‘연안하구생태계 복원 국가전략’에서 복원사업의 우선순위를 결정하는 기준으로 다음의 다섯 가지 항목을 들고 있으며, 우선복원대상 서식지 유형과 위치를 구체적으로 명시할 것을 권고하였음(RAE, 2002).
  - 복원사업의 시급성(서식지 회귀성, 생물종이나 서식지에 대한 위협)
  - 서식지나 생물종이 제공하는 생태적 편익
  - 서식지나 생물종을 성공적으로 복원할 가능성
  - 서식지나 생물종 복원에 대한 대중적 지지
  - 서식지나 생물종이 제공하는 사회적·경제적 편익



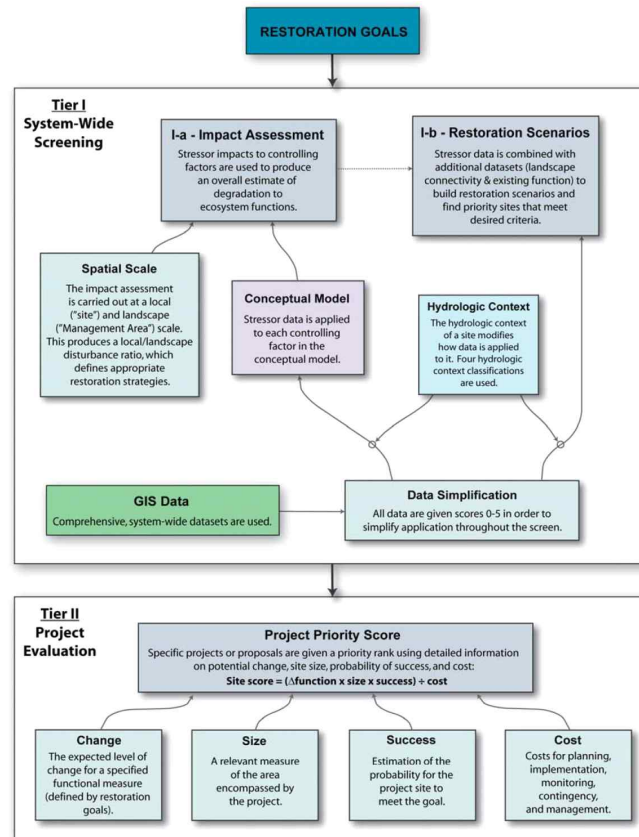
A NATIONAL STRATEGY  
TO RESTORE COASTAL AND  
ESTUARINE HABITAT

〈그림 1〉 미국 연안하구생태계 복원  
전략 보고서

### 3) 미국 Lower Columbia River Estuary

- Evans et al.(2006)은 Lower Columbia River Estuary에서 복원이 필요한 장소의 우선순위를 결정하는데 활용할 수 있는 복원 우선순위 평가체계(Restoration Prioritization Framework)를 제안하였음
- 이 평가체계는 두 단계 접근법을 채택하고 있는데, 평가체계의 개념 및 설명, 복원장소 우선순위 설정에 필요한 자료, 계산법, 절차 등을 담은 엑셀 스프레드시트, 공간정보를 담고 있는 GIS 데이터베이스로 구성되어 있음
- 첫 번째 단계(Tier I)에서는 GIS를 이용하여 제방 축조, 농업, 수상구조물, 물 흐름 제한구조물 등 다양한 인위적 요소의 영향을 평가하며, 이외에도 수문 연결성, 기존 기능에 관한 정보도 분석함
- 두 번째 단계(Tier II)에서는 복원비용, 기대되는 기능적 변화, 복원장소의 크기, 복원사업의 성공확률 예측값 등에 관한 자료를 바탕으로 구체적인 복원사업 제안서의 우선순위를 평가함

## 복원 우선순위 평가체계



〈그림 2〉 Lower Columbia River Estuary의 복원사업 대상지를 선택하기 위해 제안된 복원 우선순위 평가체계 (Evans et al., 2006)



#### 4) 하구서식지 복원대상지 선정기준 사례(PEP HRWG, 2000)

- Peconic Estuary Program의 서식지복원 워킹그룹은 Peconic Estuary의 복원대상지 우선순위를 설정하기 위한 평가방법론을 개발하였으며, 하구의 서식지를 조석습지, 거머리말 서식지, 해변, 사구, 담수습지 등 서식지 유형별과 지방자치단체별로 복원대상지 우선순위를 설정하였음
- 복원대상지 우선순위 설정 평가지표는 크게 생태적 요소, 실현가능성 요소, 공공/경제적 편익 요소의 세 가지 범주로 제시되었음
- 각 지표별로 점수 부여 기준을 제시하였으며, 생태적 요소 100점, 실현가능성 요소 100점, 공공·경제적 편익 요소 50점 등 총 250점의 점수를 부여하여 복원대상지의 우선순위를 결정하는데 이용하였음

<표 1> Peconic Estuary의 서식지 유형별 우선복원대상지 선정기준(PEP HRWG, 2000)

범주 및 지표	점수	비고
생태적 요소	100	
사라진 서식지의 가치	-30	멸종위기종, 위협에 처한 생물종, 특별관심 대상 생물종의 세 유형으로 구분
훼손 정도	30	심각, 보통, 낮은 세 단계로 구분
과거의 서식지 유형	8	기록 유무 및 정도에 따라 3단계로 구분
제안된 복원사업의 규모	10	면적에 따라 4단계로 구분
서식지 인접성/인근지역 토지이용	20	인접정도에 따라 5단계로 구분
복원목표 기능	5	영양염류 제거, 종다양성, 지하수 보호, 야생동물 이동통로의 네 가지 유형으로 구분
경관 서식지다양성	6	다양성 증가에 기여 또는 미기여의 두 가지 유형으로 구분
주정부 보호대상 생물종	16	멸종위기종, 위협에 처한 생물종, 특별관심 대상 생물종의 세 유형으로 구분
주·지방정부 보호구역 인접성	5	인접 또는 미인접의 두 가지 유형으로 구분
실현가능성 요소	100	
복원대상지 소유권 형태	18	네 가지 유형으로 구분
관련 계획과의 연관성	10	연관성 유무의 두 가지 유형으로 구분
복원계획 수립 단계	17	진행정도에 따라 세 가지 유형으로 구분
재원마련 정도	10	재원의 일부라도 확보 유무의 두 가지 유형으로 구분
복원사업 성공확률	25	세 단계로 구분
지역사회/이용자 지지도	5	확실한지지, 반대 없음, 확실한 반대의 세 가지 유형으로 구분
복원후 유지관리 필요 정도	15	필요 없음, 소규모 관리, 대규모 관리의 세 단계로 구분
공공·경제적 편익 요소	50	
공공 접근성 및 인식 제고	10	접근성 제고, 인식 제고의 두 가지 항목
상업 및 여가 이용 제고	20	이용 정도 및 영향에 따라 다섯 가지 유형으로 구분
상업 및 여가 이용 생물종 편익	20	2종 이상에 편익, 1종에 편익, 간접 편익의 세 가지 유형으로 구분



- 총 91개의 복원사업이 우선순위 결정을 위해 제출되었으며, 이 가운데 우선순위 결정에 적합한 72개 사업에 대해 평가가 이루어졌음
- 복원대상지의 우선순위를 결정하는 과정에서 각 지방자치단체에 대해 서식지 유형별로 우선순위를 결정하였으며, 이를 통해 특정 지역에 복원대상지가 집중하는 것을 방지하고자 하였음

<표 2> Peconic Estuary의 서식지 유형별 복원우선 대상 사업수(PEP HRWG, 200)

서식지 유형	우선순위 대상 사업수	기타 제안 사업수
조석습지	4	13
해변 및 사구	3	2
연안 초지	2	1
하구 및 내만	1	4
갈대 조절	3	25
하천서식지 및 생물이동로	2	1
담수습지	-	-
조간대 갯벌	-	-
연안 숲	-	-
거머리말 서식지	3	8

주) 담수습지의 경우 PEP HRWG의 방법으로 우선순위 결정 불가능

## 5) 해초지 복원대상지 선정기준 사례(Short et al., 2000)

- Short et al.(2002)은 미국 북동부 지역을 대상으로 거머리말(*Zostera marina*) 복원의 최적 대상지를 선정하기 위한 기준을 제시하였음
- 대규모 거머리말 이식을 위한 장소를 선정하고 우선순위를 결정하는데 문헌정보, 참조생태계 자료, 간단한 야외조사 결과 등을 종합하여 복원대상지 선정모델을 제시하였음
- 뉴햄프셔항만청이 발주한 복원사업의 일환으로 진행한 이식사업가운데 가장 성공적이었던 곳들에 나타나는 물리적·생물학적 특성을 토대로 선정 기준을 개발하였음
- 복원대상지 선정은 3단계로 구분하여 제시
  - 가) 1단계: 부적절한 지역을 사전에 걸러내기 위해 예비이식적합성지수 (preliminary transplant suitability index)를 개발하는데 이용 가능한 환경정보 사용
    - (1) 환경정보: 과거 및 현재의 거머리말 분포, 자연 상태의 거머리말 서식지와 인접성, 퇴적물 분포, 파랑 노출정도, 수심, 수질(식물플랑크톤 현존량, 용존무기질소,

총유기질소, 투명도, 부영양화지수, 또는 서식지 조건)

### 3 - 2

### 거머리말 복원대상 후보지역 선정

Parameter (source)	PTSI rating	Reference
Historical eelgrass distribution (distribution maps)	1 for previously unvegetated 2 for previously vegetated	Fonseca et al. (1998)
Current eelgrass distribution (distribution maps)	0 for currently unvegetated 1 for currently vegetated	
Proximity to natural eelgrass bed (map or GIS calculation)	0 for <100 m 1 for ≥100 m	Orth et al. (1994)
Sediment (distribution map)	0 for rock or cobble 1 for >70% silt/clay 2 for cobble free with <70% silt/clay	Kenworthy & Fonseca (1977) Short (1987, 1993)
Wave exposure (map or GIS calculation)	0 for >mean + 2 SD <sup>a</sup> 1 for ≤mean + 2 SD <sup>a</sup>	Kopp et al. (1994) Murphy & Fonseca (1995) Fonseca et al. (1998)
Water depth (NOAA navigation charts)	0 for too shallow or too deep 1 for shallow edge of reference bed 2 for average of reference bed 1 for deep edge of reference bed	Short (1993)
Water quality (based on available phytoplankton pigments, DIN, TON, Secchi depth, eutrophication index, or habitat requirements)	0 for poor 1 for fair 2 for good	Batiuk et al. (1992) Dennison et al. (1993) Costa et al. (1996)

<sup>a</sup>Measurements at local natural (reference) eelgrass beds

<그림 3> 거머리말 복원대상 후보지역을 골라내기 위한 예비이식적합성지수의 계산에 사용하는 자료의 유형과 등급구분 기준(Short et al., 2002)

- 나) 2단계: 예비이식적합성지수를 이용해 골라낸 우선대상지역에서 시험용 이식 거머리말의 생존 및 성장, 광량, 생물교란 등에 대해 현장조사 실시
- 다) 3단계: 예비이식적합성지수 계산과 현장조사 결과를 이용하여 각 우선대상지역별로 이식적합성지수(transplant suitability index) 점수 계산
- (1) 이식적합성지수는 예비이식적합성지수, 광량, 생물교란 평가, 그리고 시험이식 결과를 반영하는 다양한 지표(시험이식 거머리말의 생존률, 성장률, 엽체 질소함량 등)를 종합하여 계산

### 3 - 2

### 거머리말 복원대상지 선정

Parameter (source)	TSI rating	Reference
PTSI	0 for PTSI = 0-1 1 for PTSI = 2-4 2 for PTSI = 8-16	
Light (field data)	0 for <20% surface irradiance 1 for ≥20% surface irradiance or no data 2 for irradiance > reference eelgrass	Dennison et al. (1993) Zimmerman et al. (1995)
Bioturbation (field data)	0 for abundant 1 for present 2 for not present	Fonseca et al. (1994) Davis & Short (1997)
Survival (test-transplants)	0 for <20% 1 for 20-40% 2 for >40%	
Growth (test-transplants)	1 for <mean - 1 SD or no data <sup>a</sup> 2 for ≥mean - 1 SD <sup>a</sup>	Short (1987) Dennison (1990)
Leaf N (test-transplants)	1 for >mean + 2 SD or no data <sup>a</sup> 2 for ≤mean + 2 SD <sup>a</sup>	

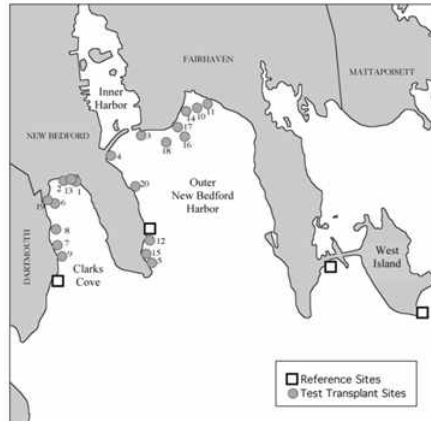
<sup>a</sup>Measurements at local natural reference eelgrass beds

<그림 4> 거머리말 복원대상지 선정을 위한 이식적합성지수 계산에 사용하는 자료의 유형과 등급구분 기준(Short et al., 2002)

- 이렇게 개발한 선정 기준을 이용하여 미국 매사추세츠 New Bedford Harbor의 거머리말 복원사업에 적용한 결과 거머리말 이식 2년 후 이식성공률은 62%에 이르렀음.

3 - 2

### 거머리말 복원사업 대상지



<그림 5> 미국 New Bedford Harbor의 거머리말 복원사업 대상지(Short et al., 2002)

### 3. 연안생태계 복원 후 사업평가 기준

#### 1) 연안생태계 복원 후 사업평가 기준

- 생태계 복원사업의 성공여부에 대한 판단기준은 사회경제적 수요를 반영한 복원사업의 목적, 복원한 생태계의 위치 및 환경조건, 해당 지역의 생태계 변화 역사 등 다양한 요인에 따라 달라지기 때문에 모든 생태계 유형 또는 지역에 공통으로 적용할 수 있는 복원사업 평가기준을 설정하는 것은 쉽지 않음
- 이에 따라 생태계 복원사업의 성공여부를 평가하기 위한 구체적 기준과 평가요소는 각 복원사업별로 설정하는 것이 일반적임. 그러나 여러 복원관련 연구기관과 연구자들이 특정 복원사업의 성공여부를 판단하기 위한 평가지표를 선정하는데 활용할 수 있는 일반적인 기준 또는 특성을 제시하고 있음
- 국제생태복원협회(Society for Ecological Restoration International)는 생태계가 인간의 도움 없이 유지될 수 있을 만큼 충분한 생물 및 무생물 자원을 가지게 되었을 때 회복된 것으로 정의하였으며, 생태계의 복원을 판단할 수 있는 9가지 특성을 제시하였음(SERI, 2004)
  - 참조생태계(reference ecosystem)에 나타나는 특징적인 종 조성을 보이고 적절한 군집구조가 갖추어졌을 때
  - 군집의 종조성에서 고유종이 차지하는 비율이 가능한 한 많을 때
  - 생태계의 발달 및 안정성 유지에 필요한 모든 기능 집단이 존재하거나 이러한 집단이 자연적인 과정을 통해 복원한 생태계로 유입할 가능성이 있을 때
  - 바람직한 생태계의 발달과정을 따라 안정성과 발달에 필요한 생물 개체군의 번식이 지속적으로 일어날 수 있는 물리적 조건이 존재할 때
  - 정상적인 생태계 발달 단계가 나타나고, 기능장애를 나타내는 표시가 없을 때
  - 복원한 생태계를 둘러싸고 있는 더 큰 생태계 또는 경관과 적절하게 통합되어 생물 및 무생물 요소의 흐름과 교환을 통해 원활하게 상호작용할 때
  - 복원한 생태계의 건강과 온전성(integrity)에 잠재적인 위협요인으로 작용할 주변 환경의 요소들이 제거되거나 최대한 감소하였을 때
  - 복원한 생태계가 있는 지역의 환경조건에 나타나는 정상적인 주기적 스트레스를 견딜 수 있을 만큼 충분한 복원력을 갖추고 있을 때
  - 참조생태계와 마찬가지로 스스로 지속가능하고, 현재의 환경조건에서 무한히 지속할 수 있는 잠재력을 가지고 있을 때

□ Ruiz-Jaen and Aide(2005)는 1993~2003년 사이에 생태복원 관련 학술지인 Restoration Ecology에 수록된 68건의 생태복원 연구(대부분 육상생태계 대상)를 분석하였는데, 분석대상 연구들은 생태계 복원의 성공여부를 판단하는데 SERI(2004)가 제안한 9가지 특성 가운데 크게 종다양성, 식생구조, 생태적 과정의 세 가지 범주를 사용하였음.

- 종다양성: 식물, 절지동물, 조류, 기타(미생물, 균류, 지렁이, 파충류, 소형 포유류, 어류)
- 식생구조: 피도, 밀도, 크기, 식물의 생물량 또는 기저부 면적, 낙엽층
- 생태적 과정: 생물간 상호작용(초식활동, 근권생물, 수분작용, 포식, 씨앗확산, 기생생물 또는 경쟁), 영양염류 상태, 토양의 유기물 또는 탄소동위원소 조성

□ Elliot et al.(2007)은 연안·해양생태계 복원사업의 성공여부를 판단하는데 활용할 수 있는 복원사업의 목표를 12가지로 제시하였음.

- 비오톱, 서식지, 생태계의 공간적 규모가 계획한 대로 확보되었으며, 자연적인 물리화학적 환경조건 하에서 참조생태계와 비교해 스스로 유지 가능할 것
- 군집의 다양성과 구조, 개체군 풍도 및 번식, 종 분포가 자연적인 환경조건에서 기대할 수 있는 정도로 나타나며 자연적 교란에 대한 회복능력을 보유할 것
- 멸종위기종과 보호종이 양호한 상태에 있을 것
- 양식 및 자연산 어패류의 유전다양성이 훼손되지 않을 것
- 보호지역의 면적을 유지할 것
- 농업 또는 야생 어업을 위해 지속가능관리를 받고 있는 면적이 주어진 사회적 수요와 생태계의 제한조건하에서 가능한 넓을 것
- 영양염 순환이 주어진 수문조건하에서 기대할 수 있는 형태이며 인간 활동에 의해 크게 변화되지 않은 상태일 것
- 침입종, 외래종 또는 도입종이 없거나 개체수가 적고, 다른 생물종, 서식지 또는 생태계의 온전성에 영향을 주지 않을 것
- 복원생태계 내부 및 외부에 존재하는 잠재적 위협요인을 제거, 최소화, 또는 저감하고, 기후변화로 인해 생물종다양성에 감지할 만한 변화가 없을 것
- 해양생태계 영양단계지수와 구조로 표현할 수 있는 군집의 기능유지 및 기능집단이 기대한 상태에 있고 장기간 지속가능(안정)할 것
- 생태계 내부 또는 생태계 사이에 존재하는 이동경로의 연결성에 물리적 또는 화학적 교란이 없을 것
- 생물종 또는 원료물질의 지속가능한 이용에 대한 잠재력이 있을 것

□ Zedler and Callaway(2000)는 기존 문헌 검토 및 사례 분석을 통해 조간대 습지의

복원평가에 활용할 지표를 지형, 수문, 토양, 식생, 동물 등으로 나누어 제안하였음

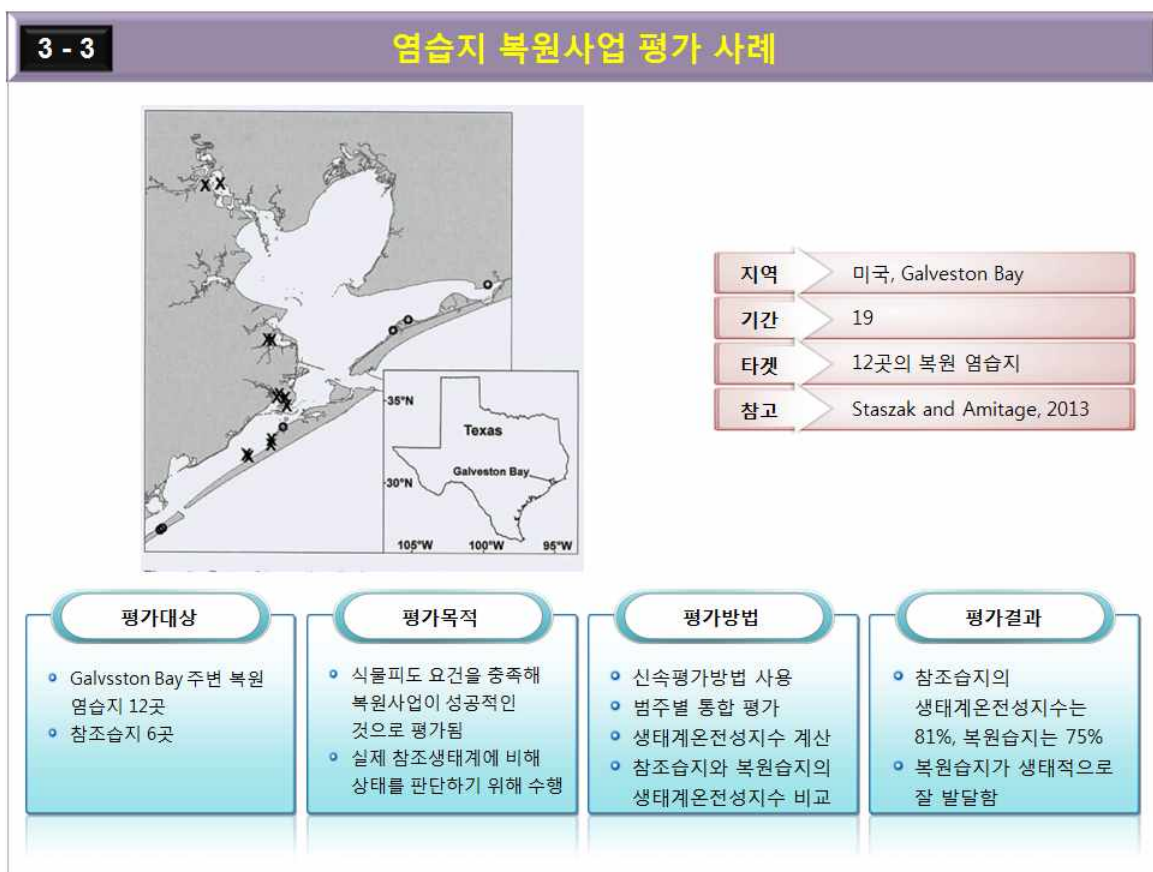
- 복원사업에 대한 평가는 단순한 점검목록이 아니라 사업의 생태적 목표와 적응적 접근방식을 통해 평가되어야 함을 강조하고 있음
- 생태적 목표를 달성하는 과정에 초점을 맞출 필요가 있다는 점에서 기존의 성공/실패라는 용어보다는 생태적 목표 기준 복원습지의 상태 변화를 나타내는 progress라는 용어를 사용할 것을 제안하였음
- Zedler and Callaway(2000)는 복원평가 기준으로 다음과 같은 항목을 사용할 것을 제안하였음
  - 토양특성 : 총질소량, 유기물량, 토성, 염도 (모두 표층 10cm 이내)
  - 조류 등지에 필요한 수관부 구조
  - 원격탐사 자료를 이용한 식생피도 상태
  - 먹이원으로 중요한 저서무척추동물 풍도
  - 어류 종풍부도 및 우점도
  - 특정 서식지 유형에 나타나는 어류의 크기분포
  - 먹이 종류 파악을 위한 내장 내용물 분석
  - 복원목표 대상 조류의 번식 정도

## 2) 연안생태계 복원사업 평가 사례

### (1) 염습지 복원사업 평가 사례(Staszak and Armitage, 2013)

#### □ 평가대상

- 미국 텍사스주 Galveston Bay 주변에 복원한 12곳의 염습지
- 복원습지가운데 7곳은 복원이후 5~9년이 경과하였으며, 5곳은 10~15년이 지났음
- 복원습지의 생태계 상태를 평가하기 위한 참조습지는 6곳 선정



<그림 6> 미국 텍사스주 Galveston Bay 염습지 복원사업 평가 대상지역(Staszak and Armitage, 2013)

#### □ 평가 목적

- 모든 복원장소가 식물피도(plant coverage) 요건을 충족해 규정상 복원사업이 성공적인 것으로 평가되었지만, 실제 생태계 수준에서 참조생태계에 비해 어떤 상태인지 판단하기 위해 평가 수행

□ 평가방법

- Galveston Bay의 염습지 복원지역을 위해 개발한 신속평가방법(Rapid Assessment Method) 사용
- 경관/복원지역 특성, 수문, 야생동식물 서식지, 퇴적층 특성 등 네 가지 범주에 모두 13개의 평가지표를 선정한 다음 지표별로 상태에 따라 0~4점의 점수를 부여한 다음 범주별로 통합하여 평가
- 범주별로 점수를 종합하여 생태계온전성지수(Index of Ecosystem Integrity) 계산
- 참조습지와 복원습지의 생태계온전성지수를 비교하여 복원한 염습지의 상태 판단

<표 3> 미국 텍사스주 Galveston Bay 염습지 복원사업 평가지표(Staszak and Armitage, 2013)

범주	지표
경관/복원지역 특성	육지방방향 이동에 대한 장애물
	인공구조물
수문 특성	심각한 변화
	보통 변화
야생동식물 서식지	식생피도
	식생 다양성
	침입종
	표재저서동물
퇴적층 특성	토양안정도
	2~4cm 식물뿌리
	25~27cm 식물뿌리
	공극수 염도
	공극수 pH

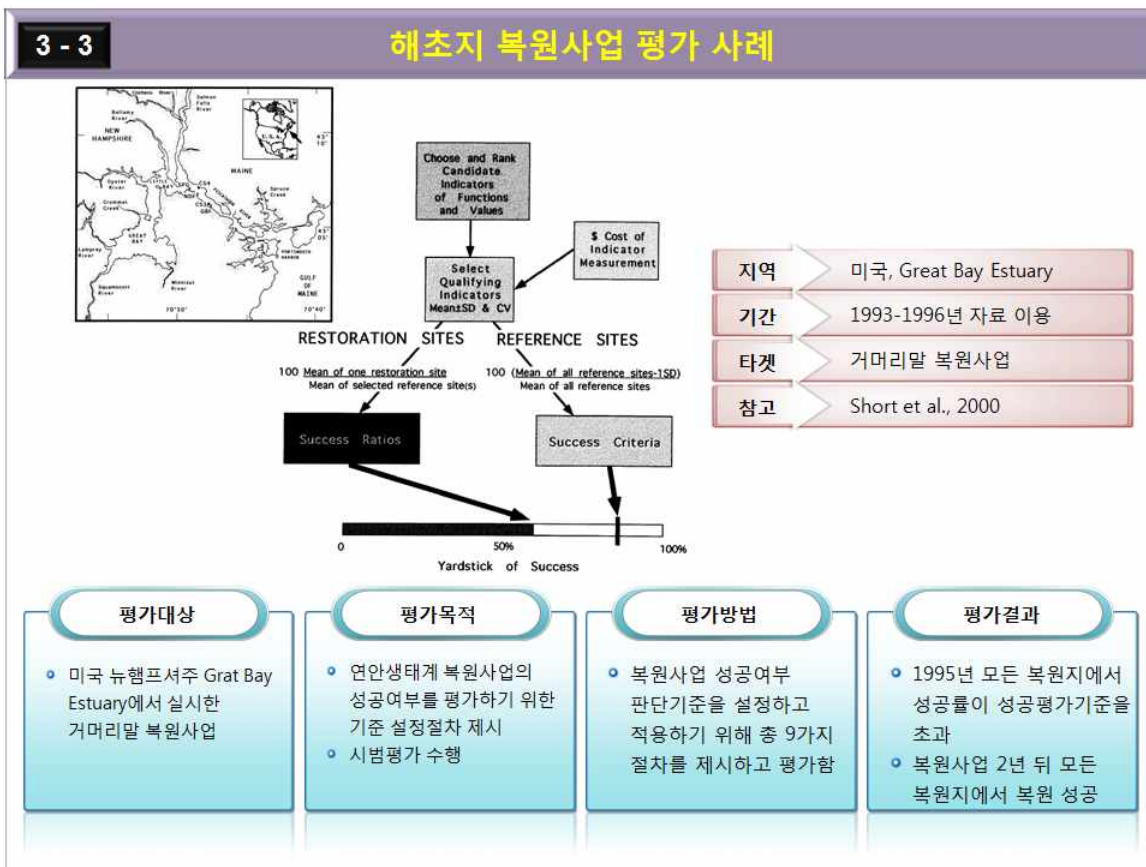
□ 평가결과

- 참조습지의 생태계온전성지수는 100% 기준(원시상태의 서식지) 81%로 계산되었으며, 복원습지는 평균 75%였음.
- 이러한 결과는 복원습지가 생태적으로 잘 발달하고 있다는 것을 나타냄.



## (2) 해초지 복원사업 평가 사례(Short et al., 2000)

- 미국 뉴햄프셔주 Great Bay Estuary에서 실시한 거머리말(*Zostera marina*) 복원사업을 사례로 하여 연안생태계 복원사업의 성공여부를 평가하기 위한 기준 설정절차를 제시하고 시범평가를 수행하였음



<그림 7> 미국 뉴햄프셔주 Great Bay Estuary의 거머리말 복원사업 대상지(Short et al., 2000)

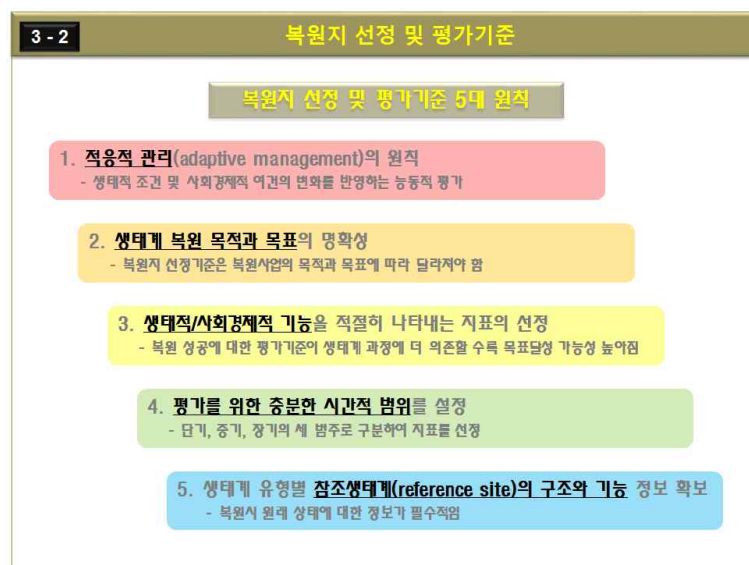
- Short et al.(2000)은 복원사업 성공여부 판단기준을 설정하고 적용하기 위한 절차를 다음과 같이 제시하였음
- 복원대상지 및 비교대상 참조생태계 위치 선정
  - 복원사업 평가에 활용 가능한 후보지표들 선정
  - 참조생태계를 대상으로 후보지표들에 대한 조사 수행
  - 후보지표 비교 및 우선순위 결정
  - 복원사업의 성공여부 평가에 적합한 지표 선정
  - 각 평가지표별로 성공평가기준 계산

- 평가의 시간적 범위 결정
  - 각 지표별로 성공률(success ratio) 계산
  - 성공평가기준 적용
- Short et al.(2000)은 이상의 절차를 New Hampshire Port에서 실시한 거머리말 복원사업에 적용하였으며, 이를 위해 1993~1996년 동안의 모니터링 자료를 이용하였음
- 평가지표 선정 : 생물량, 밀도, 저서무척추동물 개체수 및 종수
  - 생물량, 밀도: 복원사업 시행 3년 뒤인 1995년에 모든 복원지에서 성공률이 성공평가기준을 초과하였음
  - 저서무척추동물 종수: 복원사업 시행 2년 뒤 모든 복원지에서 복원 성공으로 평가
  - 저서무척추동물 개체수의 경우 변동계수 계산결과 평가지표로 적절하지 않은 것으로 평가되었음

#### 4. 복원대상 연안생태계 선정 및 성공여부 평가 기준 개발 방향

- 모든 연안생태계를 대상으로 우선 복원대상 연안생태계 유형 및 대상지역을 선정하고 복원사업의 성공여부를 평가하는데 활용하는 표준화된 기준은 없음. 선진국의 경우 각 생태계 유형별 또는 사업별로 복원사업의 목표, 복원하고자 하는 생태계의 유형별 특성, 복원대상지의 환경 조건, 복원대상지를 둘러싸고 있는 주변 지역의 압력 요인, 복원대상지에 존재하였던 생태계의 유형 등에 대한 정보를 바탕으로 다양한 연구에서 제시하고 있는 일반적 기준을 참고로 해당 사업에 적절한 기준과 절차를 개발하여 연안생태계 복원사업 선정과 평가에 활용하고 있음
- 선진국의 우선복원대상지 선정 및 복원 성공여부 평가 기준과 절차에 대한 분석을 통해 향후 우리나라 연안생태계 유형별 우선복원대상지 선정과 복원사업의 성공여부 평가 기준 및 절차의 개발에 필요한 방향은 다음과 같이 제시할 수 있음
- 복원사업의 평가기준은 적응적 관리원칙을 적용하여 생태적 조건 및 사회경제적 여건의 변화를 반영하는 능동적 평가체계를 갖추어야 함(Hackney, 2000)
  - 연안생태계 복원 목적과 목표를 명확하게 제시하여야 함
    - 라) 복원대상지 선정과 성공여부 평가지표는 복원사업의 목적과 목표에 따라 달라짐.
  - 연안생태계 유형별로 복원대상지 선정 기준과 절차, 복원사업 후 사업의 성공여부 평가 기준과 절차를 정립할 필요가 있음.

- 복원하고자 하는 연안생태계의 구조보다는 이들 생태계가 가지고 있는 생태적·사회경제적 기능을 적절하게 나타낼 수 있는 지표를 선정할 필요가 있음
  - 복원사업의 성공여부를 평가하는 기준이 복원대상 생태계에서 회복하는 생태적 과정과 기능에 더 의존할수록 목표달성 가능성이 더 높아짐(Hackney, 2000)
- 복원하고자 하는 연안생태계 유형과 대상지역의 위치 등을 고려하여 복원사업의 평가에 충분한 시간적 범위를 설정하여 복원사업을 추진할 필요가 있음
  - 연안생태계는 일정한 상태에 머무르는 정적인 존재가 아니라 끊임없이 변화하는 동적인 시스템이기 때문에 복원사업의 평가를 위한 시간적 범위가 충분하지 않을 경우 생태계에서 일어나는 다양한 변화를 반영하지 못하여 적절한 평가가 이루어지지 못할 가능성이 큼
  - 이런 점을 고려하여 성공여부 평가 지표의 경우 단기, 중기, 장기의 세 범주로 구분하여 지표를 선정할 필요가 있음
- 복원사업의 구체적 목표와 성공여부 평가 기준을 설정하는데 필요한 참조생태계(reference site)의 정보를 연안생태계 유형별로 충분히 확보할 필요가 있음
  - 참조생태계의 구조와 기능에 대한 정보는 복원대상지에 어떤 유형의 생태계를 복원하고 어떤 기능을 복원할 것인지 판단하기 위한 기본 정보임
  - 또한 복원사업의 성공 여부에 대한 평가는 참조생태계의 상태를 기준으로 이루어지기 때문에 참조생태계에 관한 정보가 없이는 평가를 수행할 수 없음



〈그림 8〉 복원지 선정 및 평가기준 5대원칙

- 복원대상 생태계의 선정에 활용할 수 있는 기준이 갖추어야 할 기본 조건으로 가장 중요한 두 가지는 연안생태계의 훼손 정도 및 생태계를 복원하였을 경우 얻을 수 있을 것으로

기대되는 편익의 크기를 들 수 있음

- 앞에서 제시한 Noss et al.(2009)이 제안한 항목가운데 첫 번째 사항과 세 번째 사항은 생태계의 훼손정도에 관한 정보이고, 나머지 한 가지는 생태계의 기여가치에 해당함

□ 연안생태계의 훼손정도에 관한 정보

- ‘해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률’에 근거한 해양생태도는 연안생태계의 훼손 정도를 파악하는데 참고할 수 있는 도구이지만, 해양생태도의 목적이 보호대상 생태계를 중심으로 해양생태계의 권역을 구분하는 것이기 때문에 생태계의 훼손 정도를 구체적으로 파악할 수 없는 한계를 가짐
- 따라서 우리나라 연안생태계의 훼손정도를 파악하고 이를 지속적으로 관리할 수 있는 수단을 개발할 필요가 있음. 해양생태계조사와 연안습지조사 등 국가차원에서 수행하는 해양생태계 조사에 훼손정도를 평가할 항목을 포함하는 방안을 추진할 필요가 있음

□ 연안생태계 복원의 편익 판단

- 훼손된 연안생태계를 복원할 경우 얻을 수 있는 생태적·사회경제적 편익의 추정은 복원생태계가 제공하는 생태계서비스를 분류하고 이러한 서비스가 생태적·사회경제적 측면에서 가지는 가치를 평가하는 과정임
- 연안생태계의 복원이 가져올 편익을 추정하기 위해서는 우리나라 해양생태계 유형별로 생태계서비스의 가치평가를 실시하고 이를 바탕으로 국가해양생태계 가치지도를 작성할 필요가 있음
- 해양생태계 가치지도를 연안생태계 훼손정도를 나타내는 지도와 같이 사용한다면 생태계서비스의 기여가치가 높은데도 훼손 정도가 심한 연안생태계를 우선 복원대상으로 선정할 수 있음
- 국가해양생태계 가치지도의 경우 연안생태계의 생태적 과정에 대한 정보를 제공하기 때문에 연안생태계의 상태를 더 정확하게 파악할 수 있게 해주며, 관리대상 우선순위의 선정, 개발사업 추진 시 비용과 편익의 판단에 기초 자료로서의 활용성이 높음
- 따라서 국가해양생태계 가치지도 구축과 관련한 연구개발 과제를 동시에 추진 필요

## 6. 참고문헌

- 국토해양부, 2009, 갯벌복원을 위한 현황조사 및 중장기 계획
- 해양수산부, 2013. 해양생태계 복원기술개발 기획연구 최종보고서
- Elliot, M., Burdon, D., Hemingway, K.L., Apitz, S.E., 2007. Estuarine, coastal and marine ecosystem restoration: confusing management and science – a revision of concepts. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 74, 349-366.
- Hackney, C.T. 2000. Restoration of coastal habitats: expectation and reality. *Ecological Engineering* 15:165-170.
- Noss, R., S.E. Nielsen, and K. Vance-Borland, 2009. Prioritizing ecosystems, species, and sites for restoration. pp.158-171. In: Moilanen, A., K.A. Wilson, and H. Possingham (eds), *Quantitative methods and computational tools*. Oxford University Press, London.
- RAE. 2002. A national strategy to restore coastal and estuarine habitat. *Restore America's Estuaries*
- Ruiz-Jaen MC, Aide TM, 2005. Restoration success: How is it being measured? *Restor Ecol* 13(3):569-577
- Short, F.T., D.M. Burdick, C.A. Short, R.C. Davis, P.A. Morgan. 2000. Developing success criteria for restored eelgrass, salt marsh and mud flat habitats. *Ecological Engineering* 15:239-252.
- Short, F.T., Davis, R.C., Kopp, B.S., Short, C.A., Burdick, D.M., 2002. Site-selection model for optimal transplantation of eelgrass *Zostera marina* in the northeastern US. *Marine Ecology Progress Series* 227, 253-267.
- Staszak, L.A. and A.R. Armitage. 2013. Evaluating salt marsh restoration success with an index of ecosystem integrity. *Journal of Coastal Research* 29: 410-418.
- Zedler, J.B. and J.C. Callaway. 2000. Evaluating the progress of engineered tidal wetlands. *Ecological Engineering* 15:211-225.

# 자연의 순환에 기반을 둔 해안사구 보전 및 복원방안

국립환경과학원 자연환경연구과 최광희 박사

# 자연의 순환에 기반을 둔 해안사구 보전 및 복원 방안

2015. 7. 24.

최광희(국립환경과학원)

## 발표순서

소개

해안사구의 개념

해안사구의 기능과 가치

사구의 형성과 환경

사구 보전 방안



남고비사막의 사구 2005

## 해안 사구의 개념

3

### ● 사구(sand dune)란?

- 모래가 퇴적되어 형성된 언덕으로서 형성장소에 따라 내륙사구 (사막) 와 해안사구로 구분
  - ※ 우리나라는 내륙사구가 없으며 해안사구만 존재

### ● 해안사구(coastal dune)

- 해류와 연안류에 의해 운반된 해빈의 모래가 바람에 의해 내륙으로 다시 운반되어 해안선을 따라 평행하게 쌓인 모래언덕
- 해안에서부터 순서에 따라 전(前)사구와 배후 사구로 구분

## 주요 해안사구





## 우리나라의 해안사구

### 남한의 사구목록

- 환경부 실태조사(2001) : 133개소
- 제1차 전국해안사구정밀조사(2003-2012)
- 제2차 전국해안사구정밀조사(2014- )
- 현재까지 약 200개소 확인

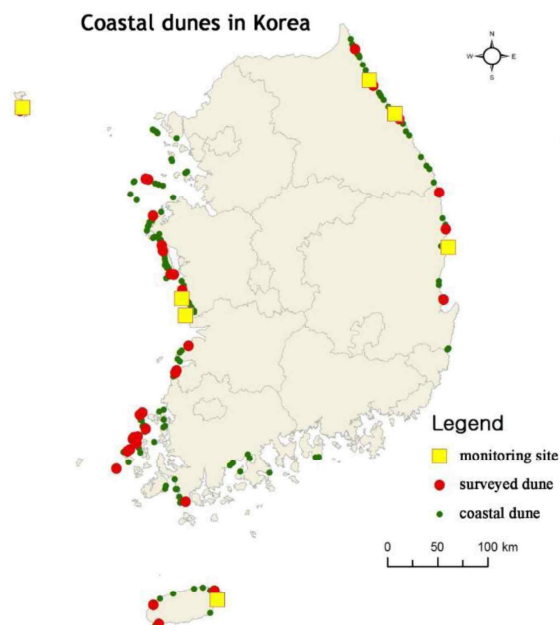
### 북한의 사구목록

- 영상자료를 통해 간접추정 (미발표자료)
- 몽금포사구 : 최대의 풍성사구
- 원산만비치리지 : 최대의 비치리지

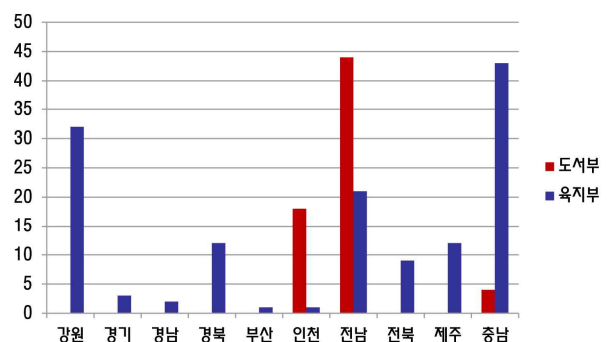


## 해안사구 정밀조사

6



- 제1차 전국해안사구정밀조사
  - 2003-2012
  - 약 200개소(육지 136, 도서 66)
  - 2012년까지 36개소 정밀조사완료
- 제2차 전국해안사구 정밀조사
  - 2013-2017
  - 2014년부터 국립생태원에서 담당



## 해안사구 정밀조사

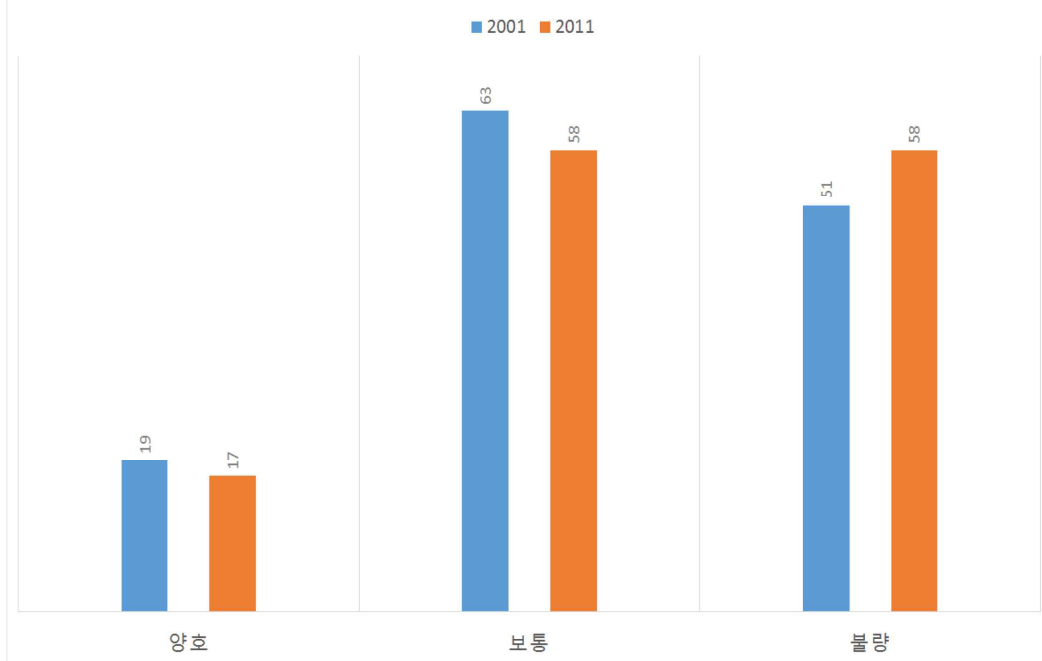


### 대상지 선정 시 고려사항

- 규모가 큰 곳 (길이, 면적)
- 전형적인 곳 (형태)
- 훼손이 덜된 곳 (보전상태)
- 알려진 가치  
(배후보호, 멸종위기종, 연대 등)

## 해안사구 보전상태 변화

<지난 10년간 해안사구 보전상태 변화>



## 보전상태 평가가 바뀐 사구들



신양사구



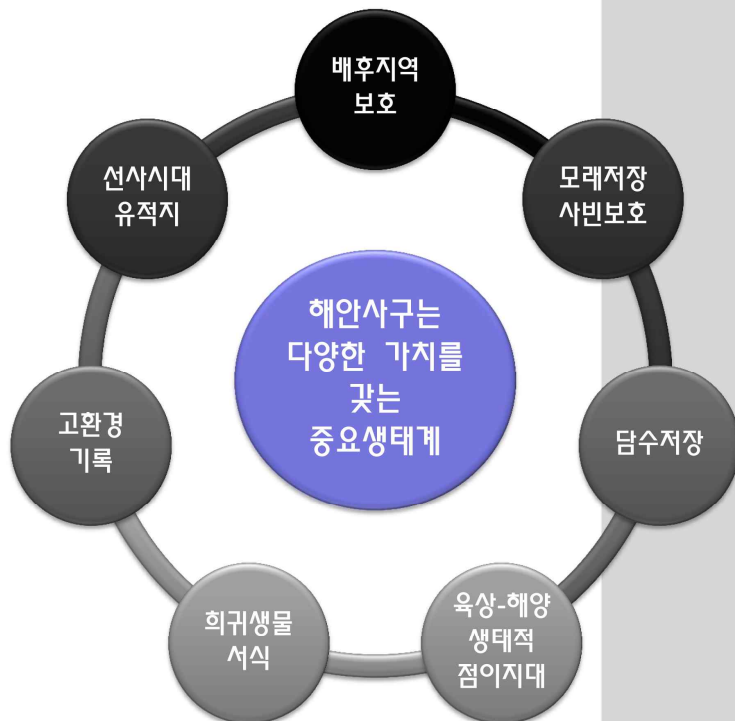
섬지코지사구



기지포사구



장신사구



# 해안사구는 왜 중요한가?

- 기능과 가치 -

## 1. 배후지역을 보호하는 자연방파제

- Natural Sea Defense (K.PYE, 1990)

- 재해방지 : 태풍이나 해일로부터 육상을 보호
- 사구를 등지고 마을이 위치

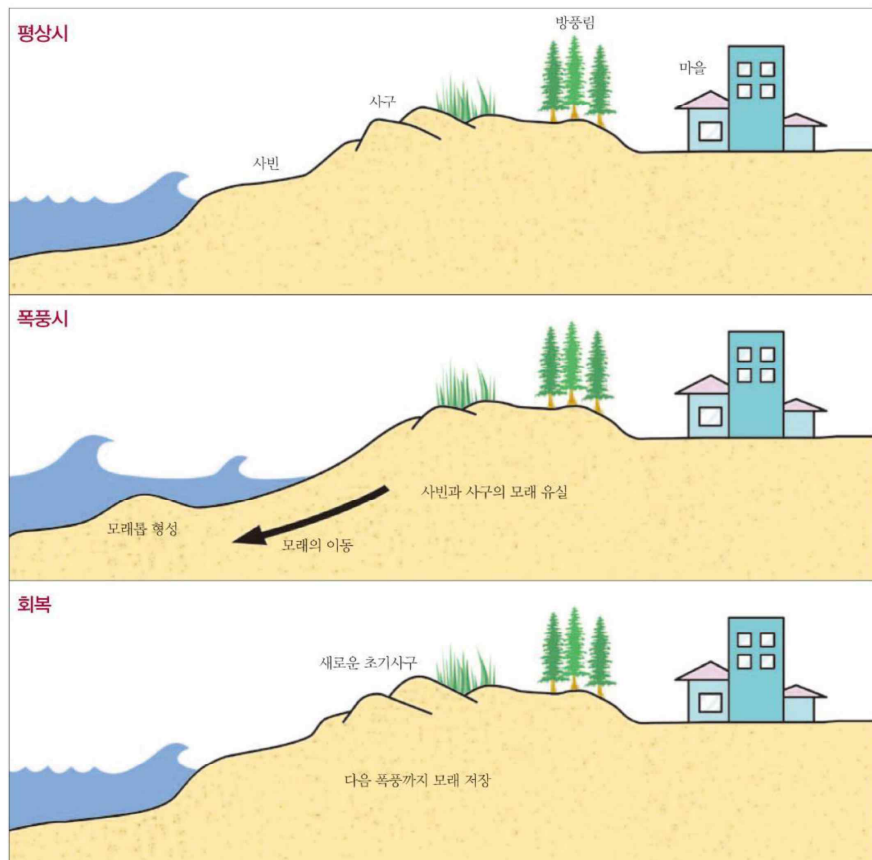


대청도 사탄동 사구



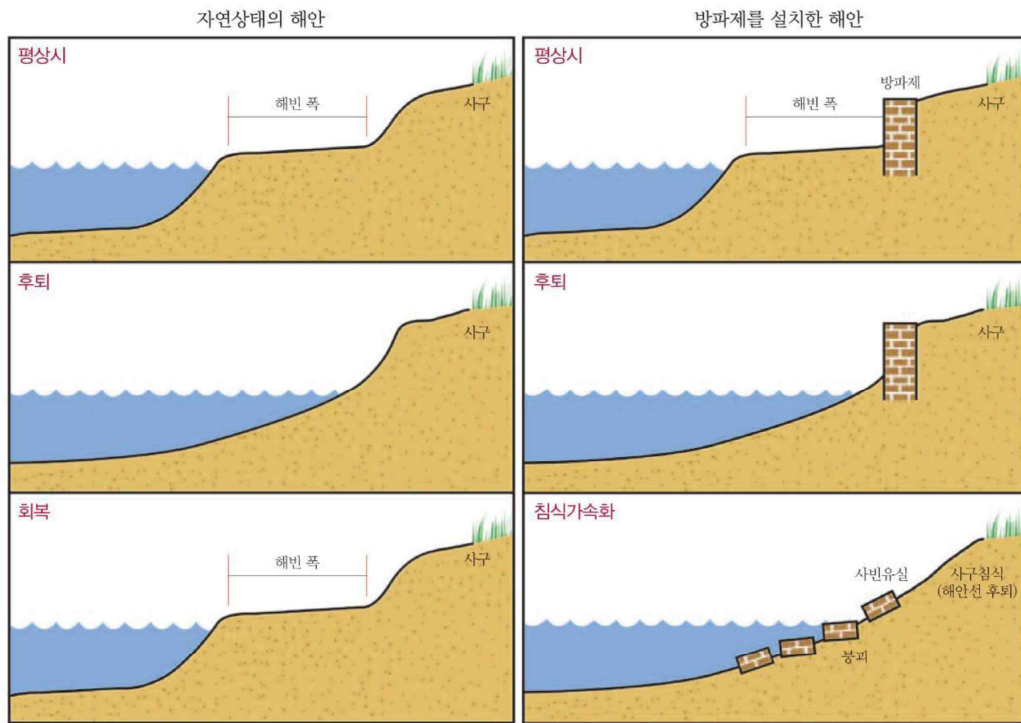
덕적도 서포리 사구

스스로  
조절되는  
방파제



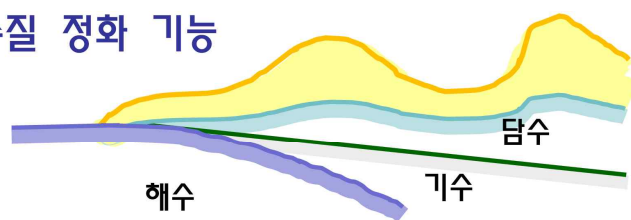


## 2. 모래 저장 - 사빈 보호



## 3. 담수 보호와 지하수 저장

- 지하수위를 높여 해수의 침입을 방지
- 모래에 의한 자연여과 - 수질 정화 기능
- 슬랙에 사구습지 형성

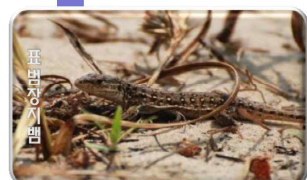
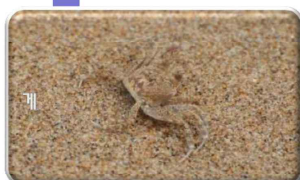


네덜란드 Kennemerland 사구



울진 평해 사구

## 4. 희귀 동식물의 서식처





## 사구 식물 1



## 사구 식물 2





## 곤충



소똥구리붙이



모래붙이거저리



해변반날개



바닷가거저리



큰집게벌레



참뿔길앞잡이

## 사구의 새 1 : 흰물떼새





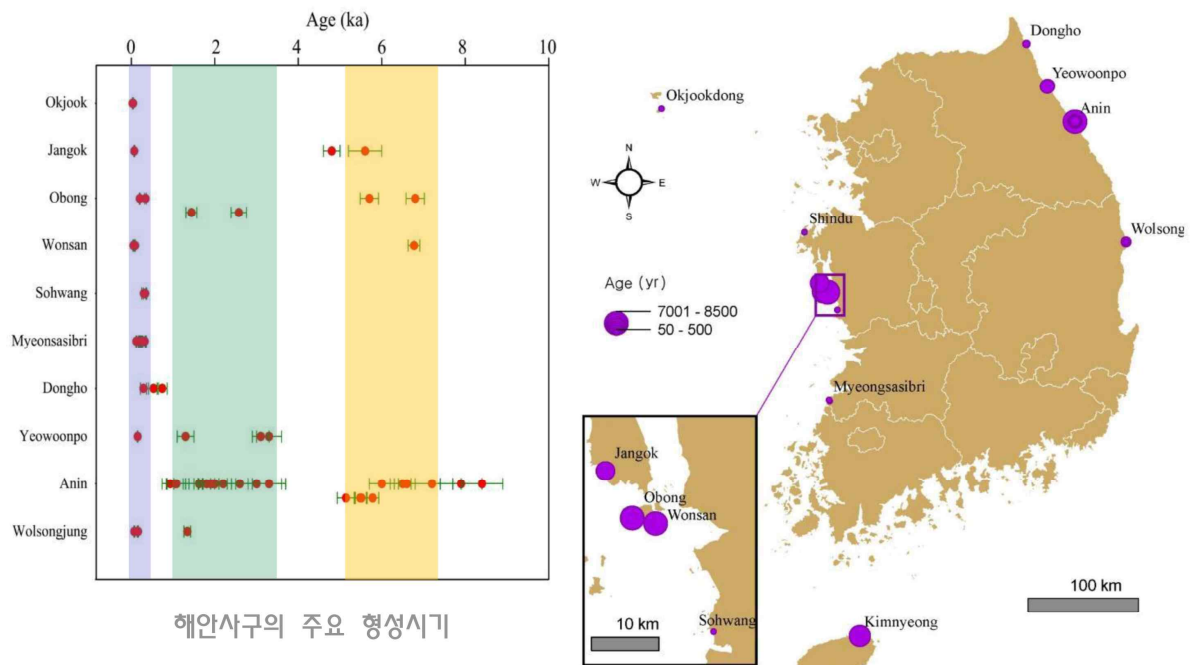
## 사구의 새 2 : 쇠제비갈매기



## 5. 고환경 기록

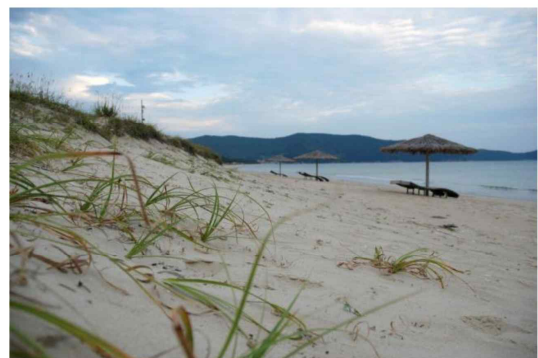


## 형성연대



## 6. 아름다운 자연경관 형성

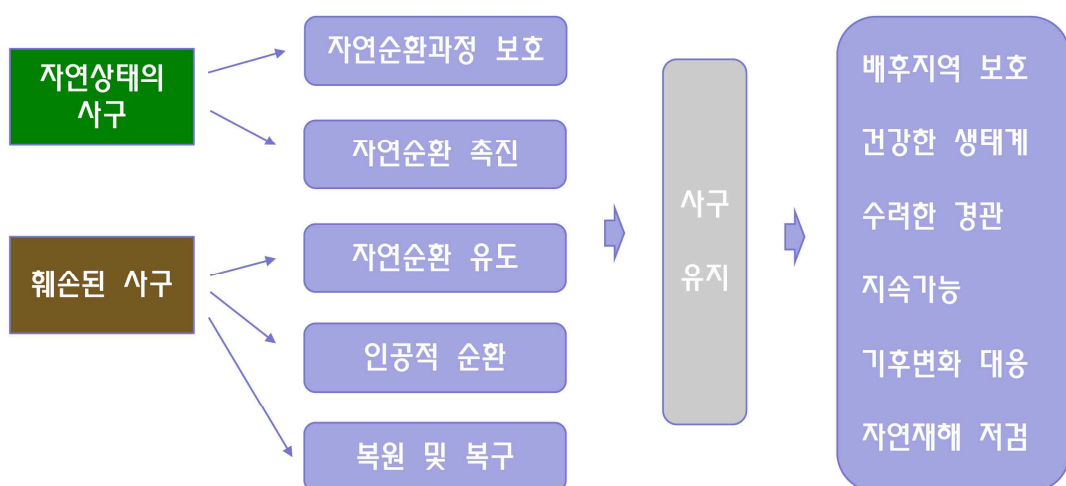
- 이국적인 자연경관
- 휴식과 여가의 장소
- 저비용
- 안전



# 사구의 자연순환에 기반한 보전전략

- 사구의 형성과 물질순환 -

## 기본 전략



## 해안사구의 환경생태



풍속

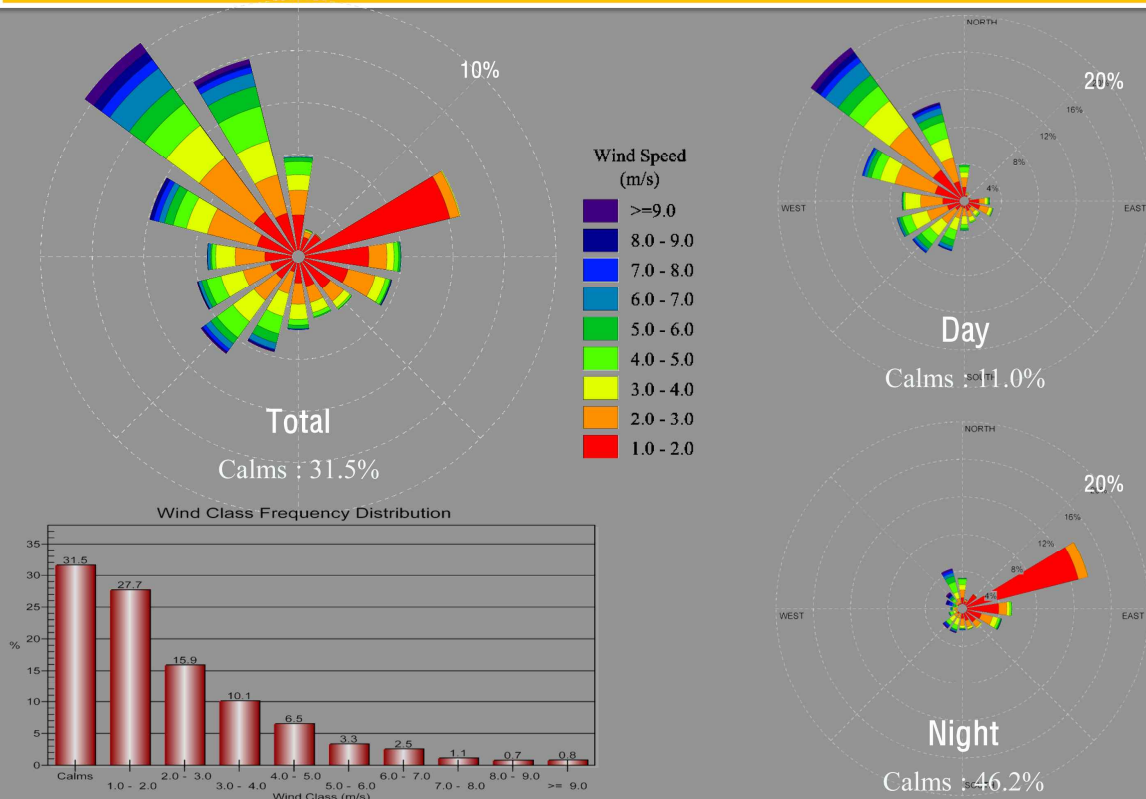
염분

수분

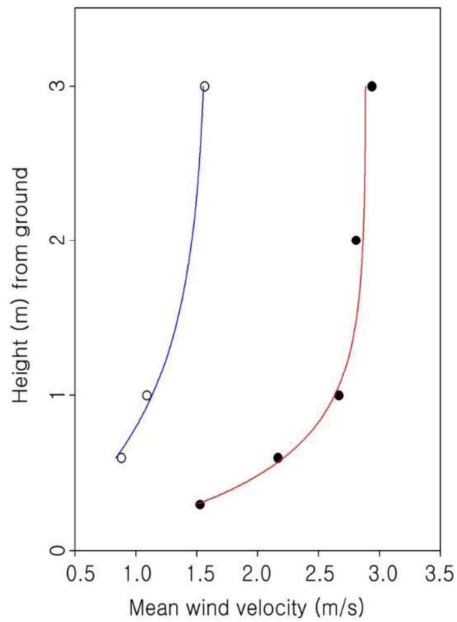
- 부족한 양분
- 염분 스트레스
- 제한된 수분
- 높은 증발량
- 모래퇴적에 의한 매몰
- 빈번한 침식



## 바람 1



## 바람 2

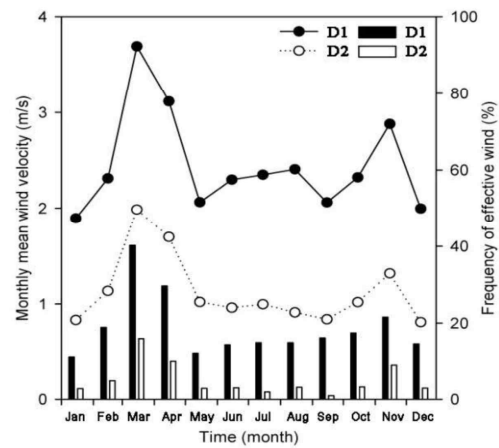


고도별 평균풍속 변화

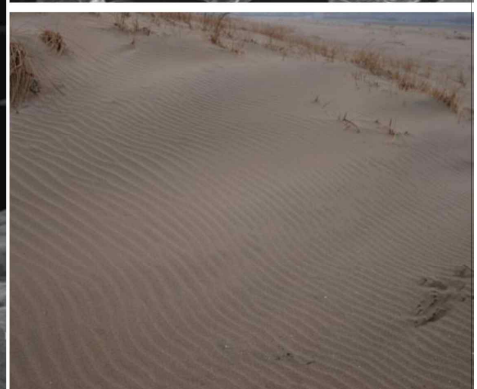
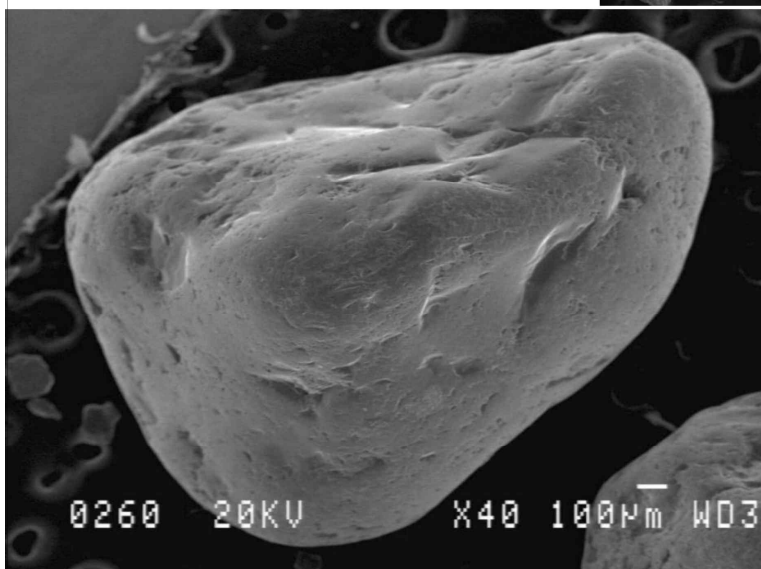
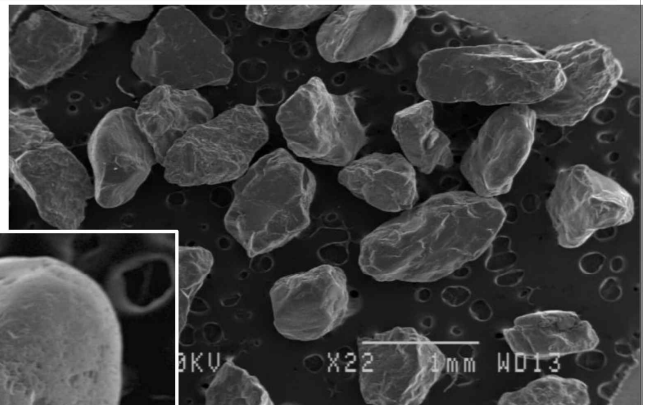
2m 높이에서, 4m/s 이상 강풍이 불 때,  
지면에서 모래가 이동

(Bagnold, 1941; Hsu and Weggel, 2002)

\* 해안림 전면에서 풍속감소로 모래이동 감소

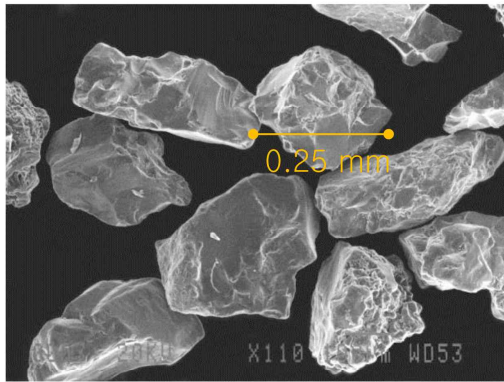


## 모래





## 해안사구의 모래



서해안사구 (신두리)

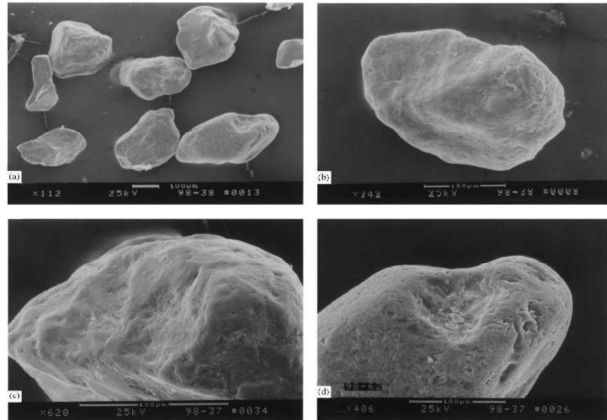
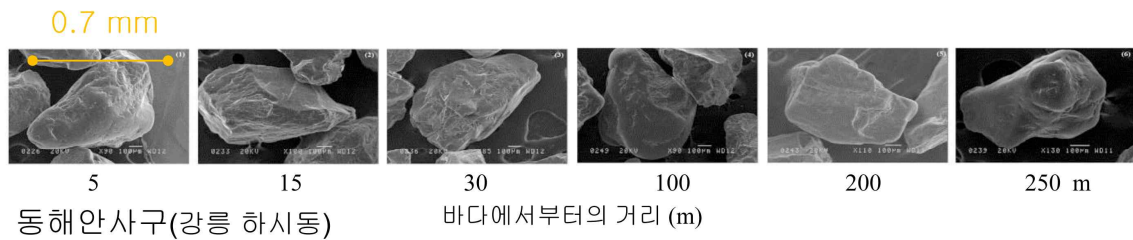


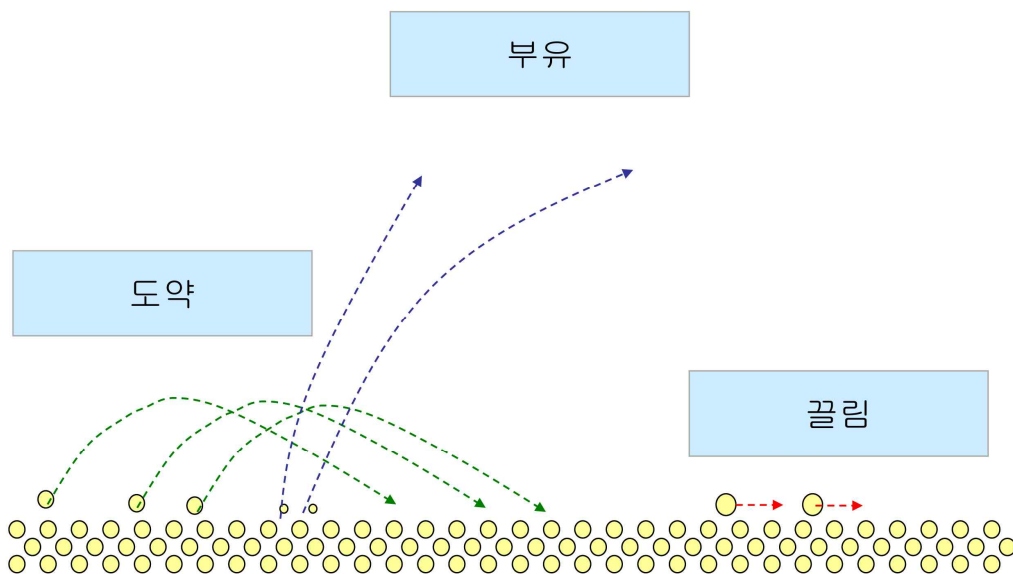
Fig. 6. SEM surface microstructures of quartz grains from the sand beds of Shimao section. (a) subrounded to round quartz grains; (b) a round quartz grain; (c) and (d) quartz grains with dish-shaped depressions.

(Source: J. Sun et al., 1999)

사막사구 (외국)

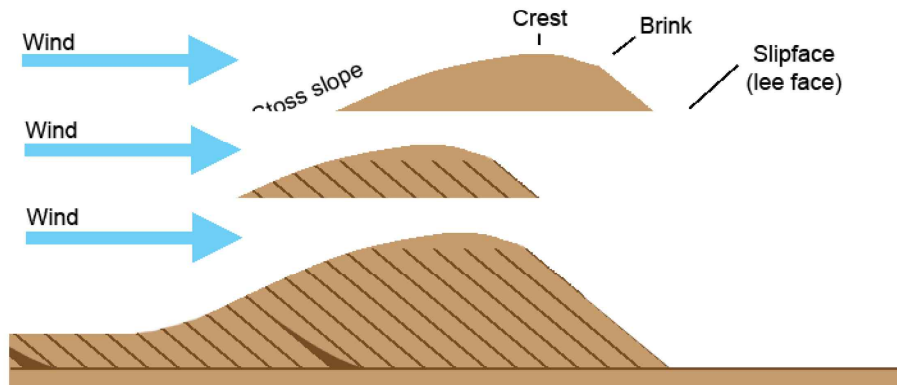


## 모래의 이동과정





## 바르한 사구의 형성과정

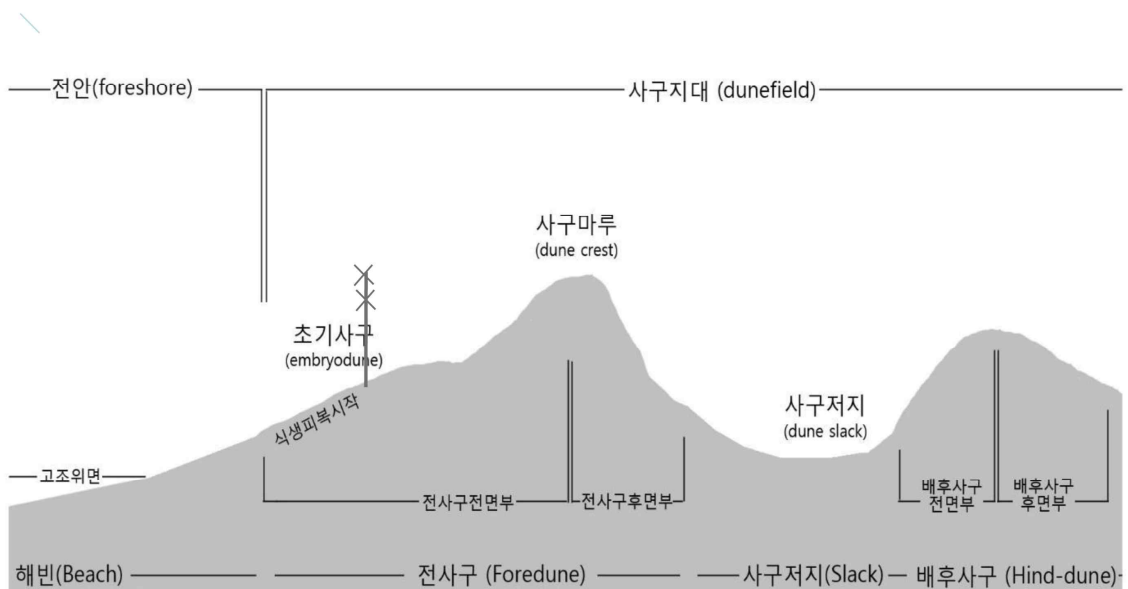


## 사구퇴적층의 특징

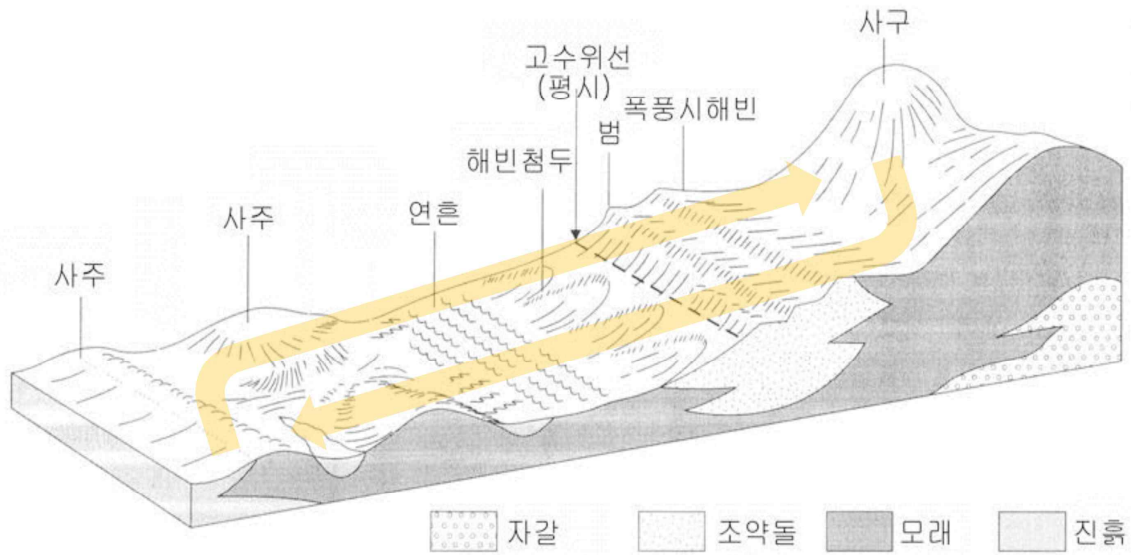
- 층리의 발달
- 균일한 입자 (good sorting)  
(크기는 지역에 따라)
- 높은 석영 비율 (약 90%)  
(제주도 지역은 패사)
- OSL연대측정에 매우 적합
- 부식층, 습지층



## 해안사구 모식도

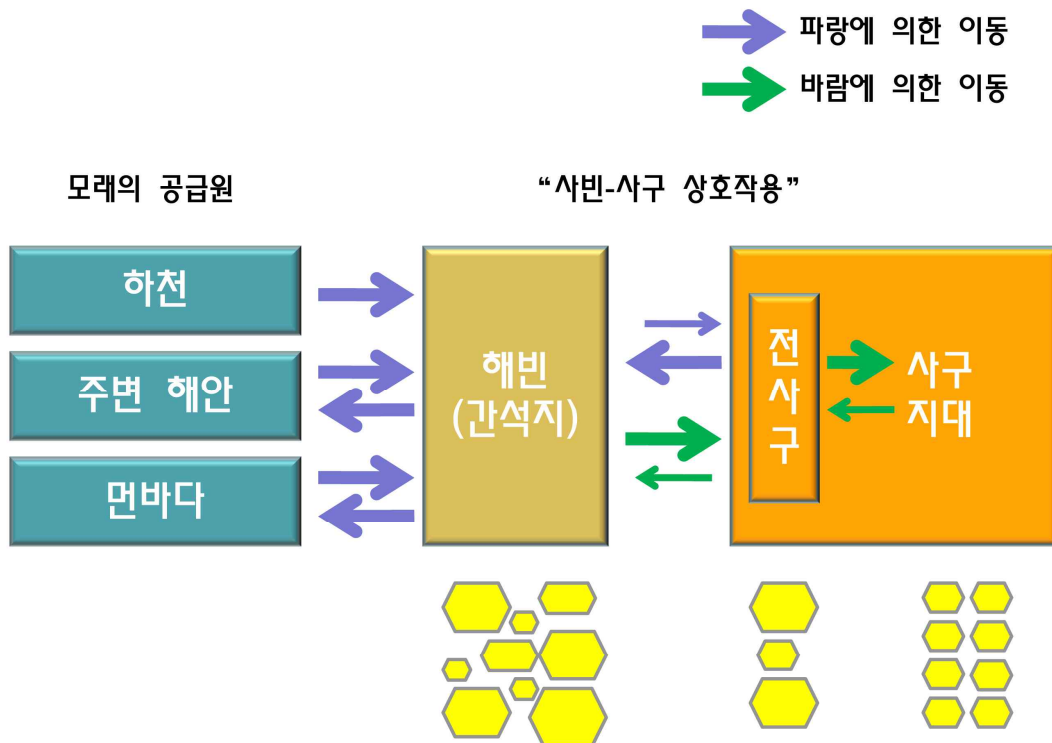


## 사빈-사구해안 모식도

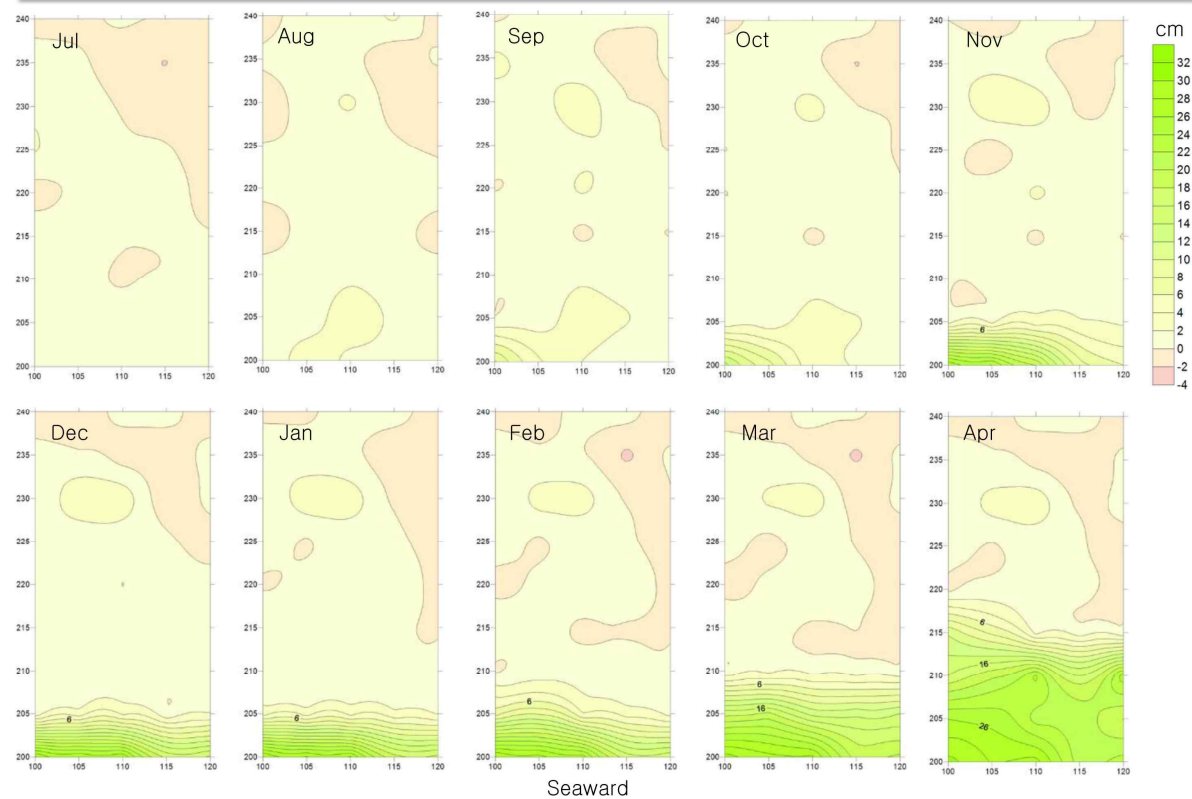


Source : Haslett, S.K., 2000

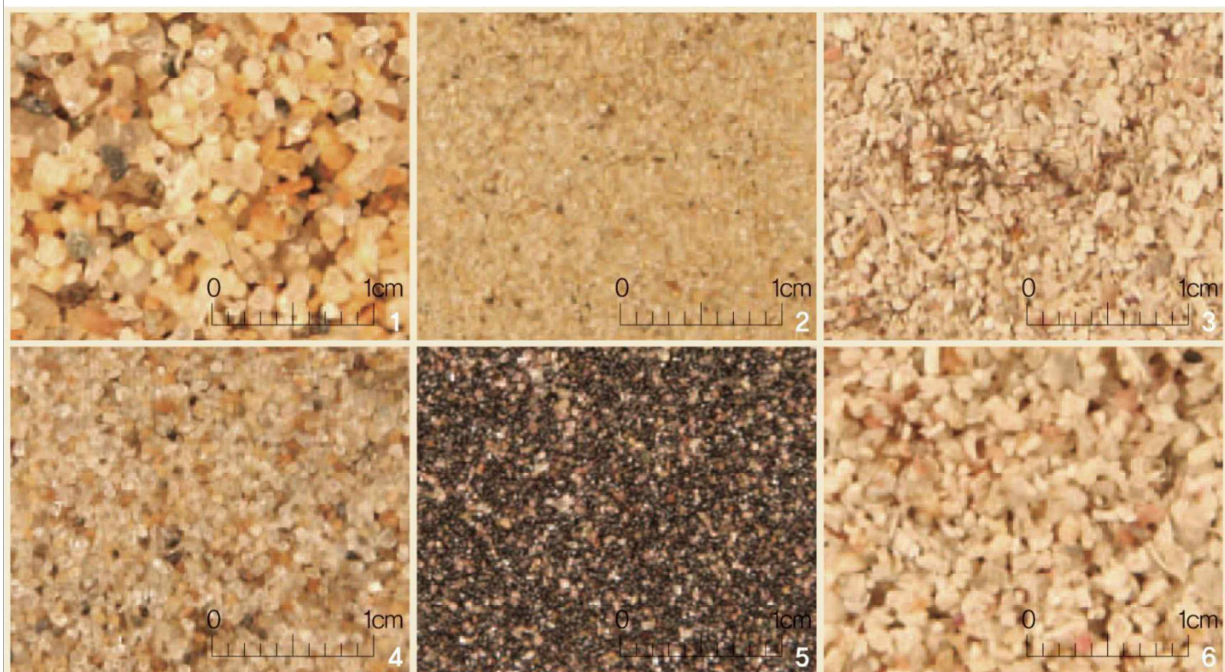
## 파랑과 바람의 역할



## 해안사구의 월별 지형변화 (소항사구)



## 다양한 모래들





## 식생의 역할

- 풍속감소
- 퇴적유도
- 모래고정



## 사구 식물의 생태적 특징

- 대상분포
- 여러해살이
- 뿌리줄기, 기는줄기
- 잎이 넓고 두꺼움
- 종자가 단단한 껍질로 쌓여 있음
- 매몰사건에 적응





자은도 백산사구

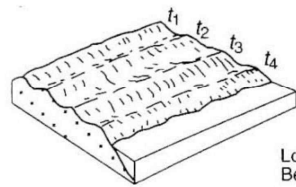


보령시 소항사구



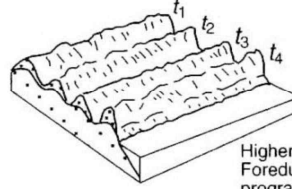
## (모래의 공급과 퇴적작용에 의한) 해안사구의 형태

A) Beach ridges **빈제열**



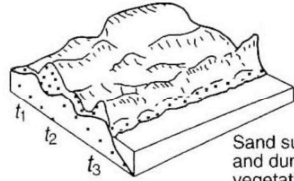
Low wind energy  
Beach progrades

B) Foredune ridges **전사구열**



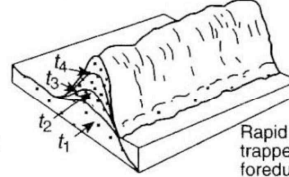
Higher wind energy  
Foredunes on  
prograding beach

C) Hummocky or transverse dunes



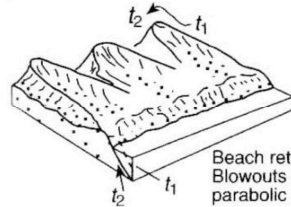
Sand supplied to beach  
and dunes, incomplete  
vegetation cover

D) Single accreted foredune



Rapid sand supply  
trapped on vegetated  
foredune

E) Parabolic dunes and blowouts



Beach retreat  
Blowouts result in  
parabolic dune migration

F) Transgressive sand sheet



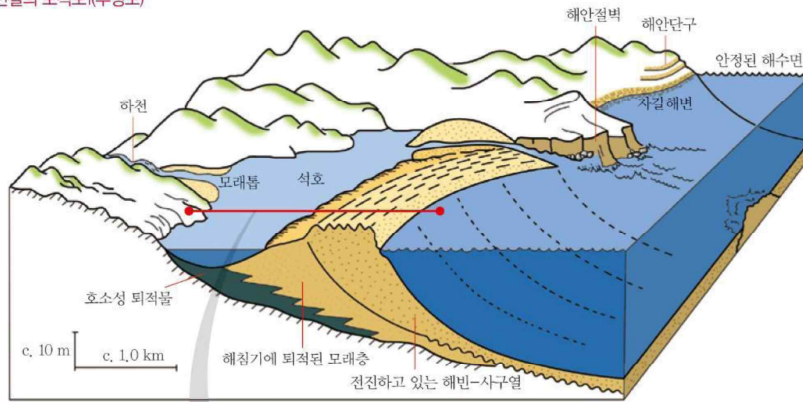
Beach retreat  
Sand drift in  
transgressive sand sheet



고성군 동호사구

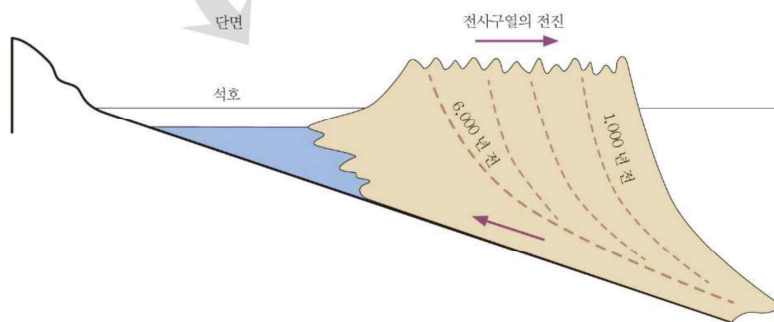


해빈열의 모식도1(투영도)

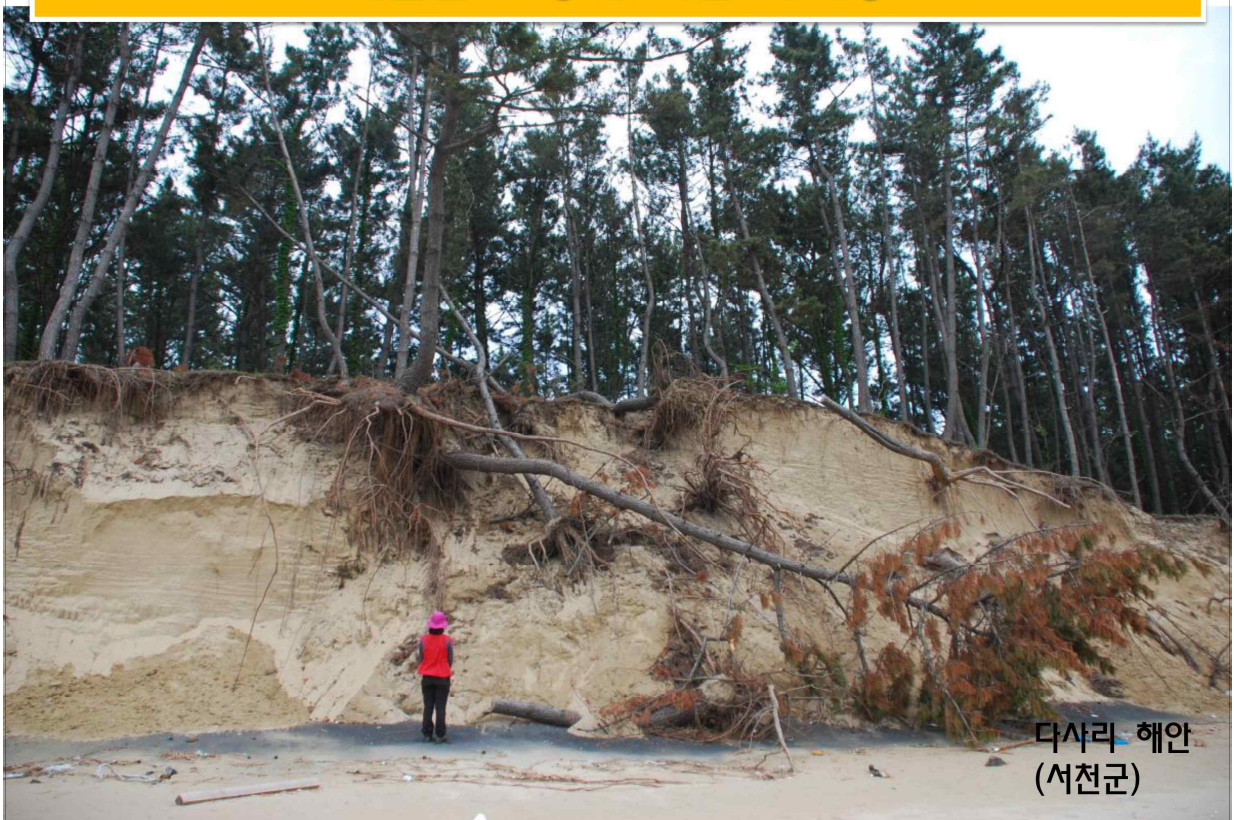


## 해빈-사구열의 전진

해빈열의 모식도2(단면도)



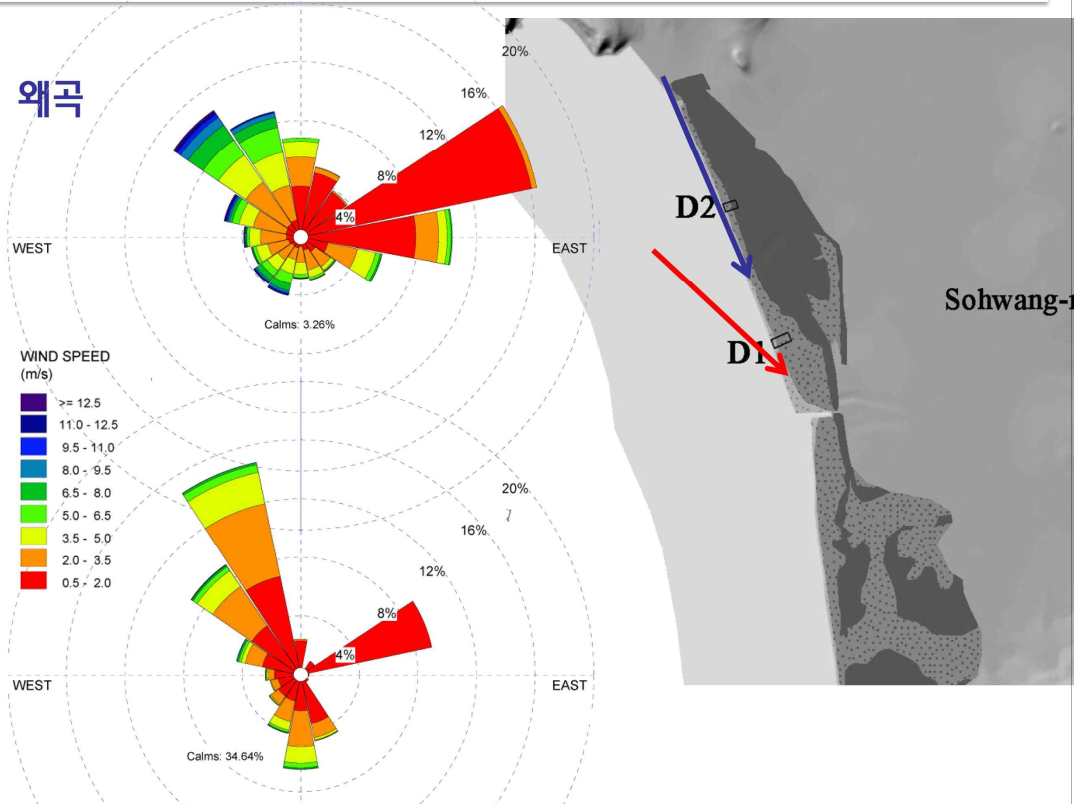
## 허안림 조성이 따른 부작용



다사리 해안  
(서천군)

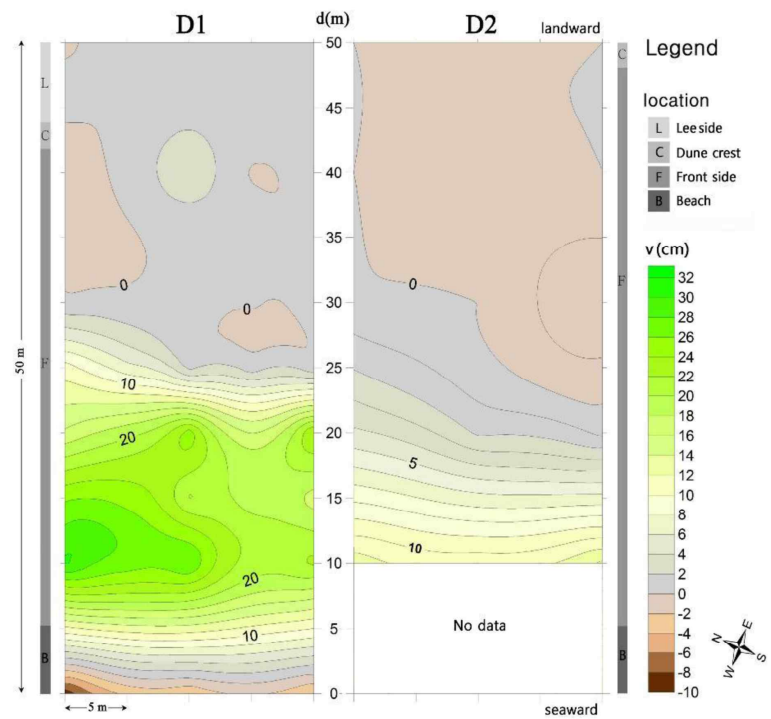
## 혜안림 조성이 따른 부작용

### 바람 왜곡



## 혜안림 조성이 따른 부작용

### 모래퇴적량 감소

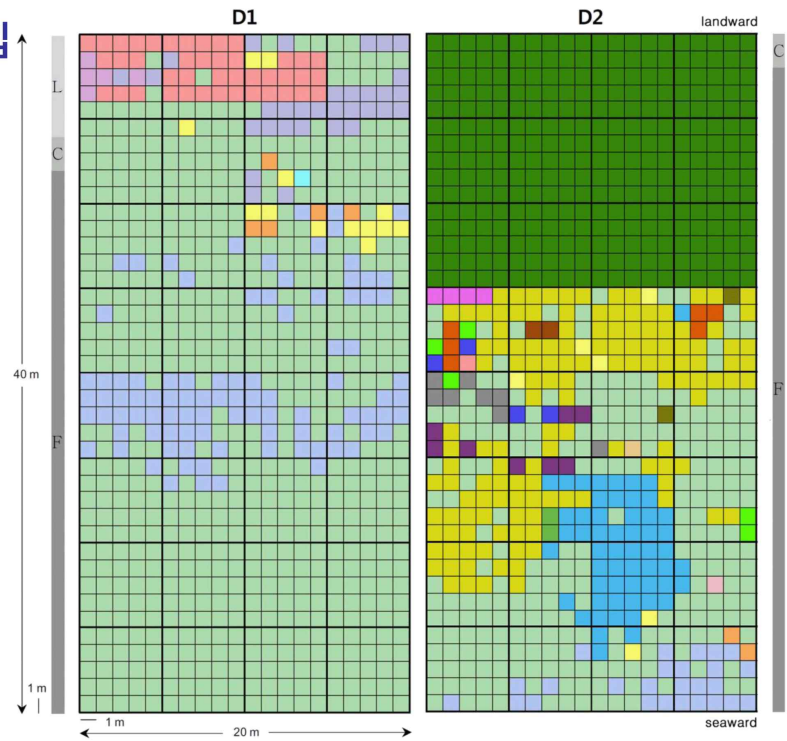




## 해안림 조성이 따른 부작용

### ● 비사구성 식물 유입

- *Elymus mollis*
- *Carex kobomugi*
- *Ischaemum antephoroides*
- *Lathyrus japonicus*
- *Carex pumila*
- *Calystegia soldanella*
- *Rosa rugosa* var. *rugosa*
- *Lonicera japonica*
- *Rubus parvifolius* for. *parvifolius*
- *Oenothera biennis*
- *Artemisia capillaris*
- *Artemisia princeps*
- *Chenopodium album* var. *stenophyllum*
- *Lepidium apetalum*
- *Metaplexis japonica*
- *Lilium tigrinum*
- *Rubia cordifolia* var. *pratensis*
- *Bromus tectorum*
- *Morus bombycis* var. *bombycis*
- *Ligustrum obtusifolium*
- *Robinia pseudoaccacia*
- *Pinus thunbergii*

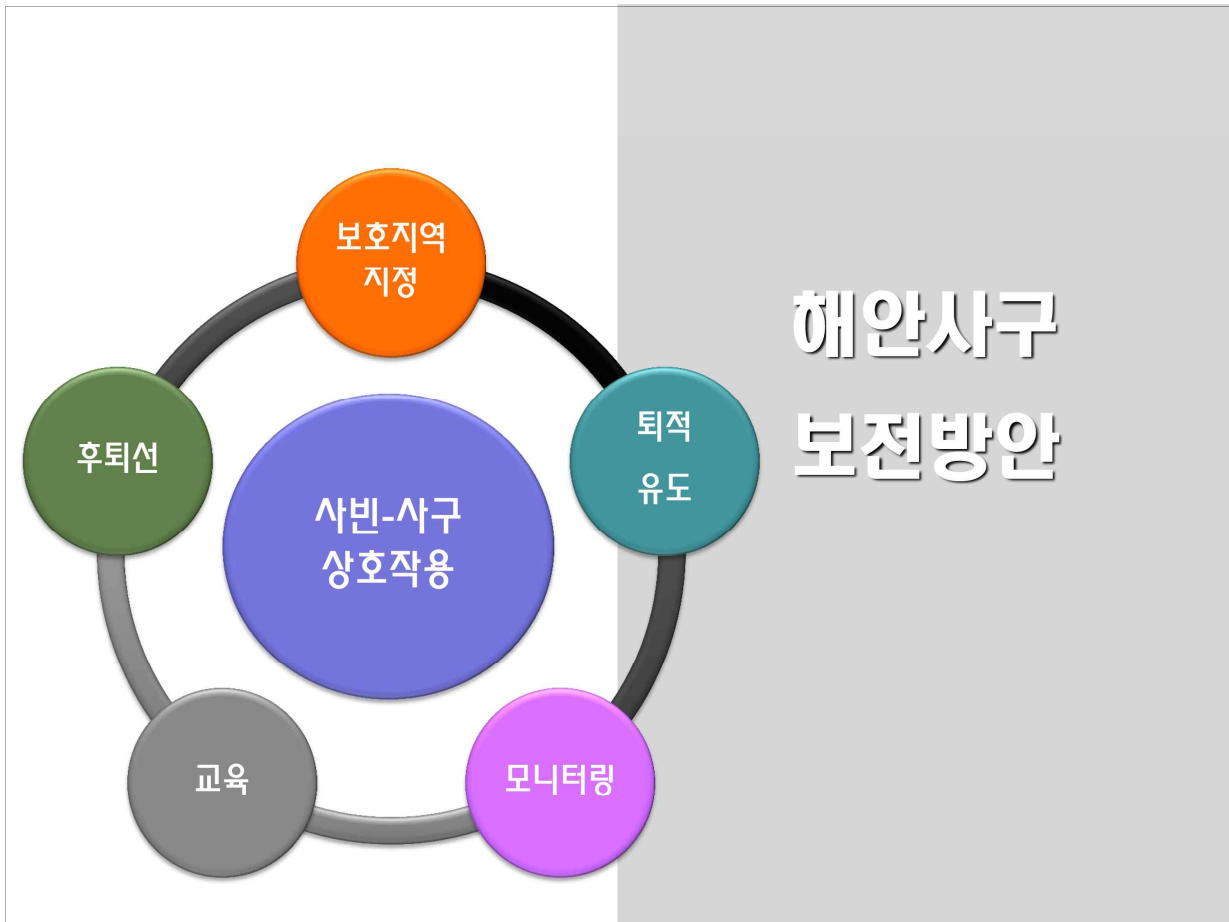


## 해안림 조성이 따른 부작용

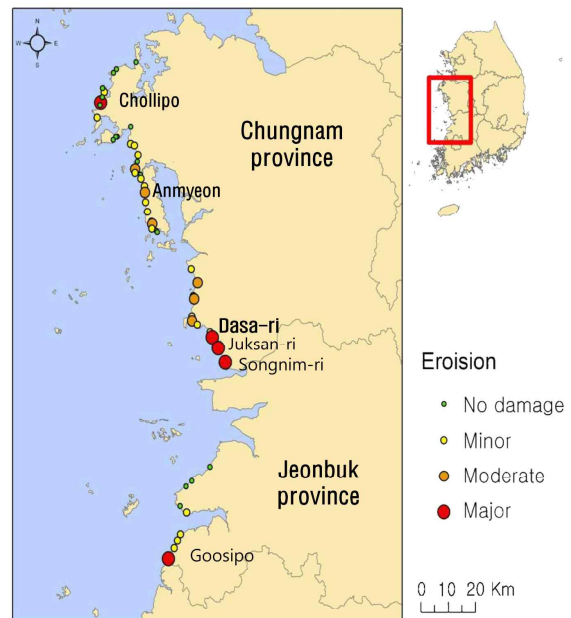
### ● 해안침식 가속화







## 보호지역 지정



태풍곤팍스(2010.9) 통과 후 침식피해상황

## 모래 퇴적 유도



## 모래순환과정 보호 (beach-dune interaction)



2010. 09



2013. 12

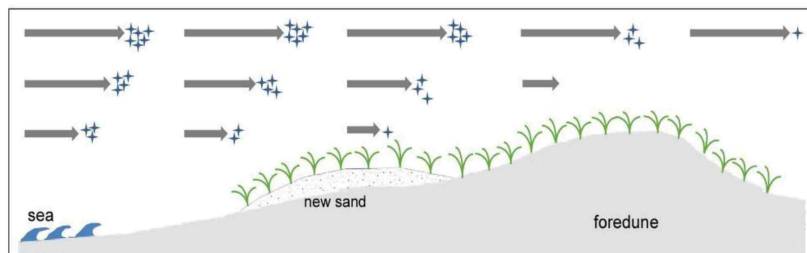


## 옹벽 설치 의제

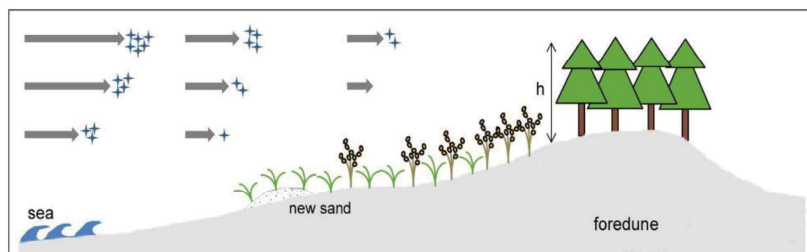
해안도로 건설 → 옹벽 설치 → 사빈유실 → 후퇴 → 옹벽 재설치 → 후퇴  
(사빈-사구 상호작용 방해)



## 적정 식생의 유지



A. grass-covered foredune



B. tree-planted foredune

< Legend >

+ salt spray    → wind    ● new sand    🌿 dune grass    🌱 nonnative plant    🌲 pine tree



# 사구환경을 이용한 침입종 제거

- 자연현상(매몰, 조풍해, 침식)을 재현
- 해수분사로 조풍해 유도가 가능함을 확인(2014)
- 모래매몰, 해수분사 등을 활용한 제거

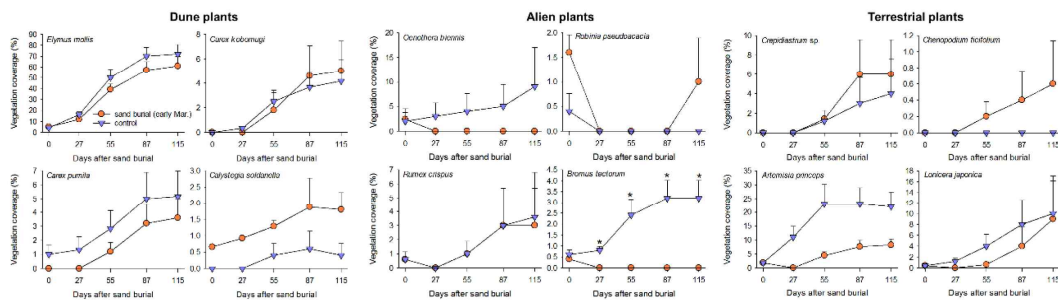
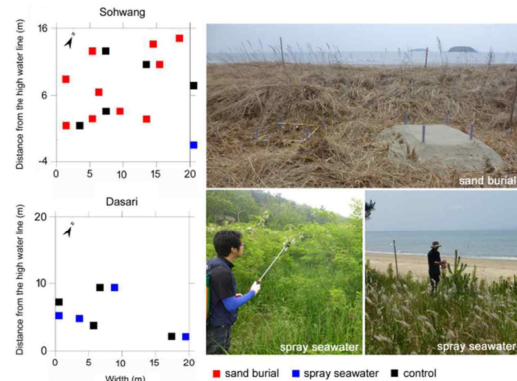
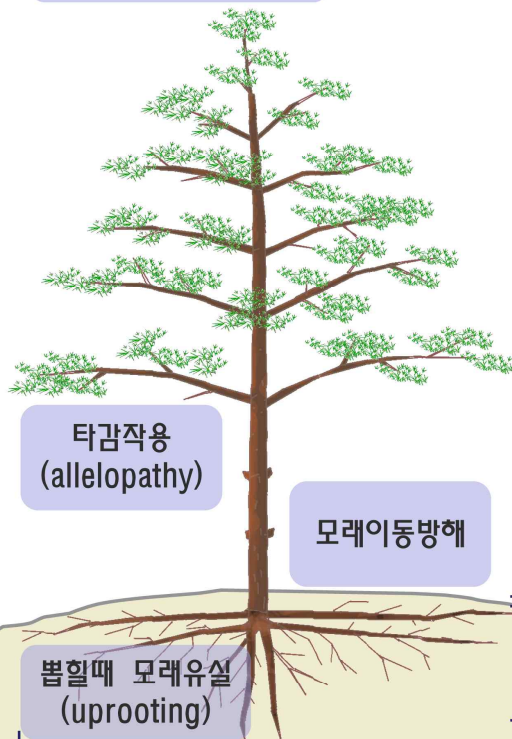


그림 3. 모래매몰 후 모래매몰 실험구(3월초)와 비실험구의 출현종별 피도 변화. \*는 모래매몰 실험구와 비실험구 사이에 유의한 차이( $p < 0.05$ )가 있음을 의미함.

강풍에 부러지기 쉽다  
(Snap off)



## 곰솔(해송)림의 장단점

장점

단점

비사방지

강풍방지

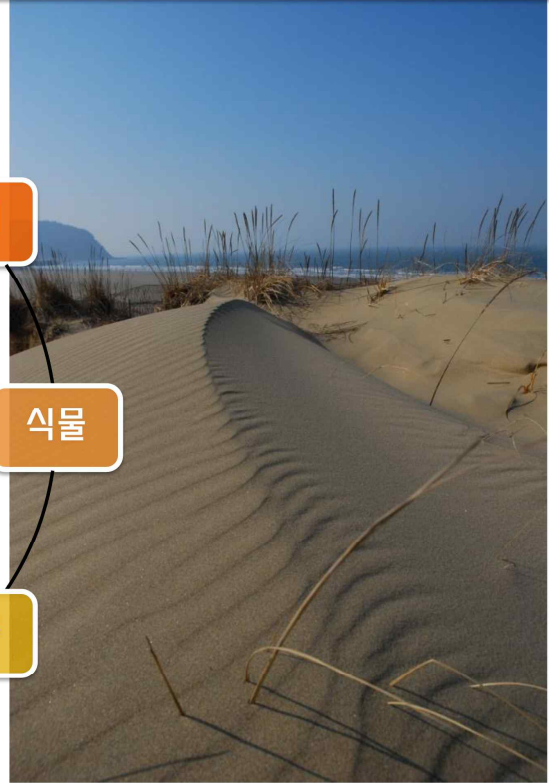
강풍에 취약

타감작용

모래퇴적방해

출처: 최광희 외, 2011 지형학회 하계학술발표회

관심 = 이해 = 보호





# 자연의 순환에 기반을 둔 해안사구 보전 및 복원 방안

최광희 (국립환경과학원 자연환경연구과)

## 1. 서론

### 1.1 배경

우리나라는 ‘한강의 기적’으로 대변되는 비약적인 경제성장을 이루어냈다. 그러나 그 이면에 자연경관이나 지형의 특성을 충분히 고려하지 못한 국토개발로 인해 자연해안의 소실, 하천의 직선화, 스카이라인 파괴, 조망축 훼손, 경관축 단절 등 심각한 경관의 훼손을 발생시켰다. 특히 삼면이 특징이 뚜렷했던 해안선은 대부분 인공구조물에 의해 획일화된 경관으로 바뀌었고 갯벌, 모래, 자갈로 이루어진 퇴적해안이 자연스럽게 남아 있는 곳은 더 이상 찾아보기 힘들게 되었다. 그럼에도 불구하고 국민소득의 향상과 주5일 근무제의 정착, 여가활동 욕구의 증가 등으로 인해 관광에 대한 수요가 크게 증가하고 있으며, 이에 대응하기 위한 지역 주민과 지방자치단체의 개발욕구는 여전히 높다. 이에 따라 지역개발과 함께 자연보전을 조화시키는 국토 정책의 중요성이 높아지고 있으며, 자연보전정책에 있어서는 생태계 보전과 함께 자연경관의 보전이 주요 과제로 대두되고 있다.

자연경관의 파괴는 해안지역에서 특히 심각하다. 우리나라의 해안선은 지난 세기 동안 약 26%가 단축되었으며, 서해안의 경우에는 거의 40%의 해안선이 사라졌다. 해안선 단축의 직접적인 원인은 항만건설을 비롯하여 매립과 간척, 해안도로, 방파제 및 방조제 건설 등과 관련이 있다. 이러한 건설행위는 주로 사회기반시설과 관련된 것이기 때문에 공공의 이익을 중시한 채 그로인한 부작용은 간과되어 왔다. 해안에 건설된 방조제와 도로 및 각종 시설물들은 해안지역에 대한 접근성을 높이고 육지를 넓혔으며 타 지역으로의 이동속도를 증가시키는데 기여하였다. 하지만 동시에 해안경관의 획일화, 고정화, 점이지대의 감소를 포함한 해안경관의 파괴라는 부작용을 낳아 왔다. 새만금 개발로 인해 금강 유역과 만경강 유역의 시간거리를 크게 단축시켰으며 새로운 육지를 창출하였으나, 하구 및 갯벌의 면적을 감소시켜 생태계를 변화시키고 우리나라 해안선의 길이를 약 2% 축소시키는 결과를 초래하였다.

해안에서 일어나는 경관파괴의 근본적인 문제는 대부분의 인간행위가 해안지역의 자연순환과정에 반하는 것들이기 때문이다. 해안경관은 다양한 요소들이 복잡하게 상호작용하고 있는, 매우 섬세한 환경이다. 바다와 육지의 경계부에 위치한 지역으로 바다와 육지의 물질교환이 이루어지고 바다생태계와 육지생태계가 만나는 접이지대로 변화에 매우 민감한 지역이다. 또한 일찍부터 인간의 거주가 시작된 곳으로 우리의 삶과 매우 밀접한 지역이기도 하다. 하지만, 결코 앞으로의 안전을 장담할 수 있는 지역이 아니기도 하다. 기후변화나 해수면변화와 같은 변화가 가장 먼저 도달하는 지역으로, 예기치 못한 자연재해가 종종 발생하는 곳이다. 따라서 해안지역의 이용과 경관계획에는 신중한 의사결정이 이루어져야 한다. 모래로 이루어진 해안에서 전형적으로 발달하는 해안사구 지형은 해안재해를 방어하는 기능을 갖고 있으나 해안개발에서 가장 먼저 사라지거나 훼손되는 경관이기도 하다.

이 글은 그 동안의 해안사구 조사자료 및 경험을 바탕으로 사구를 보전하고 복원할 수 있는 방안을 글의 목적으로 한다. 이를 위하여 우리나라 해안에 분포하는 사구 현황과 그 특성을 먼저 기술하고 해안사구지대의 자연순환과정에 대해 설명하고자 한다. 자연순환에 반하지 않는 계획이나 정책이야말로 지속가능한 것이기 때문이다.

## 1.2. 사구의 종류와 분포

사구(砂丘, sand dune)는 모래가 쌓여 있는 언덕(hill)이나 능선(ridge)을 뜻하는 지형으로 사막, 바닷가, 호숫가, 강가 등지에서 볼 수 있으며, 주로 바람의 작용에 의해 만들어진다고(최광희 등, 2011). 사구는 그것이 위치한 지역의 바람, 모래공급량, 식생 등 주변 환경에 따라 크기와 모양이 매우 다양하게 나타난다. 대규모의 사구는 사하라, 칼라하리, 고비와 같은 사막지역에서 잘 나타나지만 모래로 이루어진 해안지역에서도 사구가 형성된다. 이렇게 바닷가에 있던 모래가 바람에 의해 날려서 사빈(모래사장) 뒤에 쌓여서 만들어진 모래 언덕을 해안사구(海岸砂丘, coastal sand dune)라고 한다. 해안지역에 나타나는 사구는 대체로 해안선과 평행하게 늘어선 하나 또는 그 이상의 열로 분포하는데, 형성과정에 따라 형태가 다르게 나타난다.

서해안의 경우, 흔히 관찰되는 사구의 유형은 풍성사구(風成砂丘, aeolian dune)이며, 바람에 의해 날린 모래가 사빈의 후면에 쌓여서 형성된 것을 가리킨다. 이들의

고도는 대체로 사빈에 비해 약 5~15 미터 정도 높게 나타나는 것이 흔하지만, 일부 지역의 사구들은 30미터 이상의 높이로 발달하기도 한다. 동해안의 대표적인 사구유형은 빈제(beach-ridge, 또는 해변열)이다. 바람의 작용이 아닌 파랑의 작용으로 발달된 것으로, 주로 파랑의 쳐올림(swash)에 의해 형성된 낮은 언덕들이 연속해서 나타나는 것이 특징이다. 빈제들의 고도는 사빈에 비해 약 3~4 미터 높이에 불과하며, 전체적으로 완만한 경사를 보인다. 간혹 이런 빈제 위로 풍성모래가 덮이는 경우가 있는데, 이를 풍모(aeolian cap)라고 부른다. 이 경우에도 해발고도는 그리 높지 않다. 따라서 동해안의 사구들은 대부분 해발 10미터 이내에 분포한다.

<참고 : 해안사구 관련 지형 용어>

파랑(wave)에 의해 운반·퇴적된 지형을 해변(海濱, beach)이라고 하는데, 해변은 퇴적물의 종류에 따라 사빈(sand beach)과 역빈(gravel beach)으로 나눌 수 있다.

사빈의 배후에 해안선과 나란하게 발달하는 모래언덕을 전사구(foredune)라고 하며, 전사구 바로 앞에서 사구로 발달하고 있는 사구를 초기사구(또는 배사구, embryo dune)라 한다. 전사구의 뒤쪽에 있는 사구는 배후사구(hind dune)라고 하는데, 학자에 따라서는 이차사구(secondary dune)라고도 부른다. 하지만 순서적인 의미가 포함된 용어인 ‘이차사구’는 최근 잘 사용되지 않는다. 배후사구가 현재의 전사구보다 먼저 형성되는 경우가 더 많기 때문이다.

사구지대에서 언덕과 언덕 사이의 낮은 부분을 슬랙(또는 사구저지, slack)이라고 부른다. 슬랙은 다시 습한 정도에 따라 건조슬랙(dry slack)과 습윤슬랙(wet slack)으로 나뉘는데, 습윤슬랙은 사구습지로 발달하기도 한다. 한편, 사구열(ridge)과 사구열 사이의 낮은 부분은 보통 스웨일(swale)이라는 용어를 사용하며, 스웨일 또한 사구습지로 나타나기도 한다.

식생으로 덮이지 않은 사구는 보통 바람의 활동에 따라 이동하는데, 이러한 사구를 활동사구(active dune)라고 부른다. 이에 비해 사구가 식생으로 덮여서 움직이지 않는 사구를 고정사구(inactive dune) 또는 피복사구(vegetated dune)라고 한다. 한편, 해안선을 따라 여러 개의 전사구가 열을 이루는 경우, 전사구열(foredune ridge)이라 부른다. 해변열(또는 빈제, beach ridge)이란 이와 비슷하지만 바람에 의해 만들어지지 않고 파랑에 의해 여러 개의 열이 형성된 경우를 가리킨다.

## 2. 우리나라의 사구 현황

### 2.1 사구 조사

우리나라 해안사구의 분포에 대한 전국적인 조사는 환경부(2001)에 의해 수행되었다. 이 조사를 통해 제주도를 포함한 육지부에 분포하는 사구의 목록이 133개로 정리되었으며, 이후 정밀조사, 도서지역 조사 등이 추가되어 약 200개의 해안사구 목록이 구축되었다. 내륙에 분포하는 133개소에 대한 실태조사 결과(환경부, 2001), 조사 대상 중 32%는 충청남도에, 24%는 강원도에 분포하는 것으로 나타났다. 한편, 보전상태가 양호한 사구는 19개소, 보통은 63개소, 파괴된 곳은 51개소로 집계되었다(표 1). 이러한 조사 결과를 토대로, 환경부는 『해안사구관리지침』을 제정(2002.9)하였으며, 이를 토대로 해안사구정밀조사를 수행하고 복원방침 수립의 근거로 사용해 왔다. 원주지방환경청의 경우에는 ‘동해안 사구 보전·관리를 위한 개발사업 사전협의 기준(2005.12)’이라는 내부 지침을 마련하여 개발 사업에 대한 협의기준으로 사용하고 있다.

사구 생태계에 대한 자료를 확보하고 우수한 사구는 보호지역으로 지정하기 위한 목적으로 ‘전국 해안사구 정밀조사’ 사업이 수행되었다. 이러한 정밀조사는 2001년 실태 조사 당시 사례지역 조사를 실시했던 신두리, 비금명사십리, 우이도(띠발넘어, 성촌, 돈목), 송죽 사구 등에 대한 개략조사를 모태로 하였다. 2003년부터 시작된 전국 해안사구 정밀조사는 제1차 조사(1기: 2003~2007, 2기: 2008~2012)와 제2차 조사(2013~2017 계획)로 나뉜다. 제1차 조사는 국립환경과학원에 의해 수행되었으며, 모두 36개 해안사구에 대한 생태계정밀조사가 완료되었다(표 2). 이 조사에는 지형, 형성과정, 식생, 식물상 및 동물상 등 지역 및 사구의 특성에 따라 8~10개 항목에 걸쳐 조사되었으며, 2006년부터는 형성연대측정이 도입되었고, 2007년부터는 조사구간을 세분화하여 조사의 정밀도가 향상되었다.



〈표 1〉 2001년 전국 해안사구 목록 (출처: 환경부, 2001)

규모	지역	양호	보통	파괴	계
대	경기도·인천				0
	충청남도	신두, 신온3리, 삼봉, 소당	몽산포, 청포대	꽃지, 신탄	8
	전라북도		장신, 광승, 명사십리		3
	전라남도		송현		1
	강원도	송죽, 동호, 오봉, 하시동	봉포, 오산, 동호, 주문진, 연곡, 맹방, 원평	송정, 망상	13
	경상북도	고래불			1
	경상남도				0
	제주도		신양, 금명		2
중	경기도·인천			방아머리(1)	1
	충청남도	구례포, 원청, 중장, 다사	학암포, 해맞이, 백사장, 안면, 승언, 죽산, 옥남, 송림	만리포, 모항, 열목, 춘장대, 선도	17
	전라북도		고사포	동호, 구시포	3
	전라남도		송석, 송평, 송계, 송종	가계, 산정, 사구미	7
	강원도	향목	화진포, 송포, 삼포, 북분, 남애	속초, 낙산, 사천, 경포대	10
	경상북도	후정, 구산, 곡강	화진	망양, 관성	6
	경상남도				0
	제주도	사계			1
소	경기도·인천			방아머리(2), 구봉, 동막	3
	충청남도		사목, 심리포, 도장, 황골, 화양염전, 셋별, 향개, 독산, 바람아래	천리포(1), 천리포(2), 연포, 몽산포구, 장삼포, 갯바위, 월전	17
	전라북도			변산, 상록, 모항	3
	전라남도		덕산, 모사, 통호, 군학, 대전, 가동, 남열	홀통, 조금나루, 증의, 송호, 율포, 장선	13
	강원도	공현진	반암, 남항진, 옥계, 용화	오호, 죽도, 안인진, 호산	9
	경상북도		봉산, 칠포	장사, 하서	4
	경상남도			상주, 송정	2
	제주도		곽지, 협재, 하모, 표선, 섭지코지, 하도	이호, 평대, 함덕	9
계		19	63	51	133

2013년부터 제2차 조사 사업이 국립환경과학원에 의해 시작되었으나, 사구조사업 무가 국립생태원으로 이관되어 현재는 국립생태원이 담당하고 있다. 정밀조사를 통해, 사구의 형성시기 및 형성과정, 우리나라 사구의 특성, 사구에 서식하는 동식물 등 생태계 자료가 체계적으로 수집되었다. 또한 최소한 20여개 사구에 대해 보호지역 지정 가치가 있음이 증명되어 추천되었으나, 대부분 해당 지자체의 개발계획이나 지역민의 반대로 인해 보호지역 지정까지는 이르지 못하였다. 현재까지 정밀조사결과를 통해 보령의 소항사구와 강릉의 하시동·안인사구가 ‘생태·경관 보전지역’으로 지정되어 금강유역환경청과 원주지방환경청에 의해 각각 관리되고 있다. 생태·경관보전지역으로 지정된 해안사구는 해당 지방 환경청에 의해 매년 형상변경, 생태계 등에 대한 모니터링이 실시되며, 5년에 한 번씩 보전 및 관리계획을 수립하는 등의 보전활동이 수행된다. 또한 환경부에 의해 3년 또는 5년 주기의 정기적인 생태계 정밀조사가 실시된다.



〈그림 1〉 소항사구(좌)와 하시동사구(우)의 전경



〈그림 2〉 생태경관보전지역 관리사무소와 안내판

〈표 2〉 ‘전국 해안사구정밀조사’ 수행지역

연도	조사지역	개수	비고
2003	동호(강원 양양), 후정(경북 울진), 원청(충남 태안), 곡강(경북 포항), 소항(충남 보령), 장신(전북 부안)	6	제1차 조사 (1기)
2004	명사십리(전북 고창), 사구미(전남 해남) 섬지코지(제주), 협재(제주), 사계(제주)	5	
2005	구례포(충남 태안), 삼봉(충남 태안) 신합(충남 서천), 우이도(전남 신안)	4	
2006	안인(강원 강릉), 구산(경북 울진)	2	
2007	원산(충남 보령), 오봉(충남 보령) 광승(전북 고창)	3	
2008	옥죽동(인천 옹진), 사탄동(인천 옹진) 고성동호(강원 고성) * 서해안 도서지역 해안사구 현황조사	3	제1차 조사 (2기)
2009	서포리(인천 옹진), 밭지름(인천 옹진) 대광(전남 신안) * 남해안 도서지역 해안사구 현황조사	3	
2010	둔장(전남 신안), 외기·내치(전남 신안) 백산(전남 신안), 면전(전남 신안)	4	
2011	비금명사십리(전남 신안), 첫구지(전남 신안) 가평리(강원 양양)	3	
2012	신양(제주), 하도(제주), 우전(전남 신안)	3	
2013	고래불(경북 영덕), 꽃지(충남 태안)	2	제2차 사업
2014	중장(충남 태안), 다사(충남 서천), 송림(충남 서천)	3	

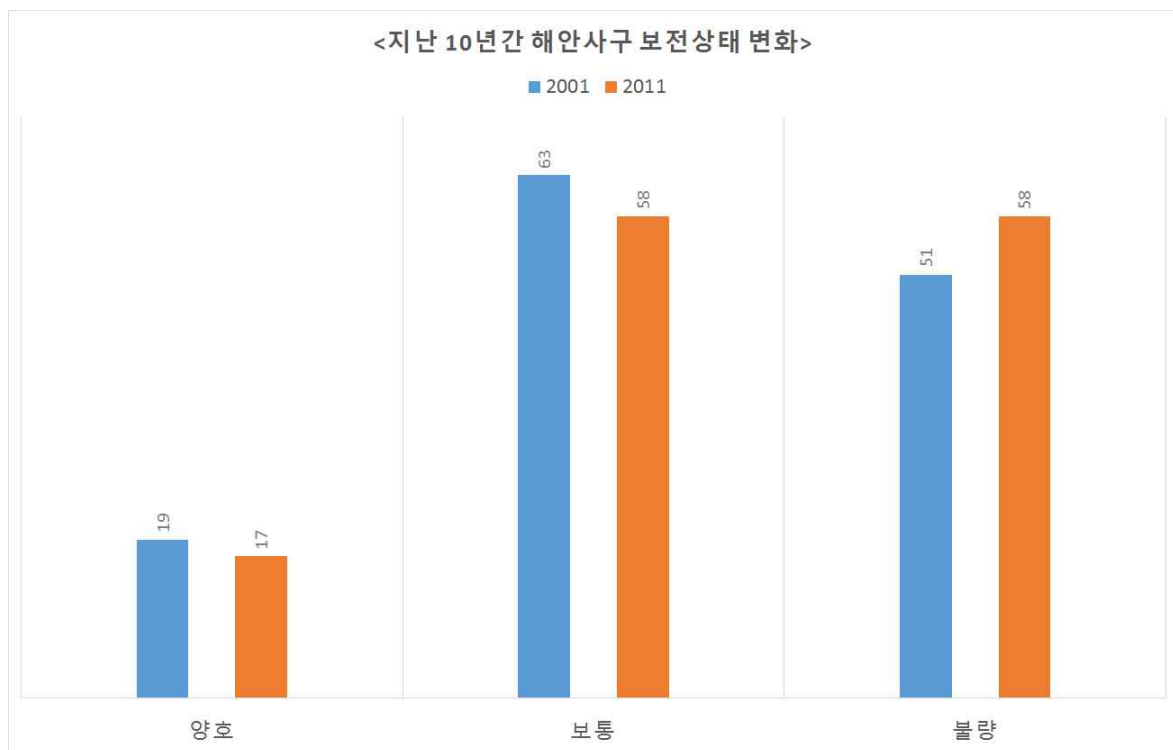
전국해안사구정밀조사 사업에서 주목해야 하는 것은 사업대상지의 선정이다. 따라서 ‘전국 해안사구 정밀조사’ 사업의 조사대상지를 선정하고 수행하는 절차를 살펴보자. 초기의 조사는 우수한 해안사구지역을 발굴하여 보호지역을 지정하는 것을 가장 큰 목적으로 하였기에, 규모가 크거나 보전상태가 양호한 지역을 우선 조사대상으로 정하였다. 2001년 환경부에서 조사한 실태조사 결과, 보전상태가 양호한 것으로 평가된 사구는 19개소였으며, 규모가 큰(해안선 길이가 2km 이상인) 것은 약 26개소로 나타났다. 이들을 추려 모두 23개 지역을 정밀조사 대상지역으로 선정하고 5년 동안 조사할 목표를 세웠다. 그리고 환경부는 2003년 양양 동호사구를 비롯한 6개 지역에 대해 시범조사 성격의 사구정밀조사를 수행하였다. 하지만 예산의 부족으로 인해 5년간 조사가 완료된 사구의 수는 당초의 목표보다 적은 20개소였다. 다행히 사업기간이 10년으로 늘면서 조사대상 사구를 36개로 수정하여 제 2기 사업이 2008년부터 착수되어 2012년에 마무리되었다.

조사대상지에 대한 계획은 몇 년에 한 번씩 수정되었다. 그 이유는 당초 보전상태가 양호한 것으로 평가된 지역들이 급속히 개발되고 변형되었기 때문이다. 따라서 조사대상지 선정 과정에는 반드시 전년도 예비답사가 포함되어야 하였다. 예비답사에서는 실제로 사업 수행을 할 만한 가치가 있는지를 평가하고 조사범위와 조사할 항목에 대한 자료를 수집하였다. 2003년 시범조사 당시에는 지형·형성환경, 퇴적물 분석, 식생·식물상, 육상곤충, 저서성대형무척추동물, 어류, 조류·포유류 등 7개 항목에 대한 조사를 수행하였다. 이후의 조사에서는 각 항목들을 보다 세분화하고 우리나라 사구생태계에 적합하지 않은 어류 등의 일부 분류군들을 제외하였다. 또한 사구의 보전 관리에 중요한 정보를 제공할 수 있는 ‘형성과정’ 분석 항목에 ‘연대측정’을 도입하였다. 대체로 2기 사업을 통해 조사된 사구들은 절대연대측정에 근거한 형성시기가 추정되어졌으며, 과거에 존재했다가 매몰된 사구습지층이 발견되기도 하였다. 예를 들어, 자은도에서 발견된 사구습지의 경우, 지난 2,000년 전부터 약 1,000년간 유지되었던 것으로 밝혀졌다.



## 2.2 해안사구 보전상태 변화

국립환경과학원은 전국 해안사구 정밀조사 사업과 자체 연구사업을 통해 사구의 보전상태 변화를 조사한 바 있다. 비록 사구에 대한 보전등급 평가가 연구자들의 주관성이 개입되고 사구의 조사가 개략적인 수준이었기는 하지만, 보전상태의 변화정도를 가늠하는 데는 매우 유용한 자료라 할 수 있다. 사구에 대한 전반적인 조사를 실시했던 2001년의 133개 사구목록을 기준으로 10년간의 변화 추이를 파악한 결과, 사구 보전상태는 대체적으로 하락한 것으로 나타났다. 지속적 관리를 통해 보전상태가 개선된 곳도 있었으나(10개소), 상당수(19개소) 사구는 보전상태가 악화된 것으로 분석되었기 때문이다.



〈그림 3〉 지난 10년 동안 우리나라 해안사구의 보전상태 변화

2001년 보전상태가 ‘보통’ 이었다가 ‘양호’ 로 등급이 상승한 경우는 지속적인 관리를 통해 보전상태가 호전되었거나, 사구가치에 대한 재평가로 인해 등급이 상승된 것들이었다. 예를 들어, 태안군의 안면사구와 도장사구는 ‘태안해안국립공원’에 의해 보호되고 지속적으로 관리되면서 보전상태가 개선되었다. 여기서 말하는 지

속적인 관리는 모래의 공급이나 돌제 건설과 같은 대규모 - 고비용 관리정책이 아니다. 방파제를 설치하지 않고 모래 포집기 같은 연성 구조물을 설치하는 등의 저비용 정책들이라는데 주목할 필요가 있다.

또한, 제주 신양사구와 표선사구는 제주도의 전형적인 사구로서 육지의 해안사구와는 다른 가치를 갖고 있음이 인정되어 보전 가치가 상승하였다. 특히, 2013년 조사된 제주 신양사구는 대부분의 해안사구가 곰솔림이라는 단일 수종에 의해 피복되어 변형된 현 시점에서 초본으로 피복된, 우리나라에서는 보기 드문 경관을 유지하는 것으로 나타났다. 신양사구가 위치한 광치기 해안은 제주올레길이 지나가는 곳으로 사구 위를 걷는 사람들을 자주 볼 수 있다.



〈그림 4〉 신양사구

등급이 하락한 사구들도 있다. ‘양호’ 등급에서 ‘보통’ 등급으로, 또는 ‘보통’ 등급에서 그 이하의 등급으로 하락한 것으로 나타난 사구들은 대부분 인위적인 요인에 의해 변형된 것들이었다. 포항의 곡강사구의 경우, 포항 신항만 건설로 인해 사구면적이 크게 축소되었으며, 공현진, 칠포, 독산, 섬지코지 등은 대규모 위락시설, 수련원, 캠핑장, 주차장 등 시설부지로 사용되면서 직접적인 훼손이 가해진 곳들이다.



그림 5. 섬지코지의 건물들과 훼손된 해안사구

방조제 건설로 인해 사빈-사구의 상호작용이 단절된 곳도 있었다. 예를 들어, 부안 장신사구의 경우, 새만금 방조제 건설에 따라 바다와 격리되면서 전혀 다른 모습의 경관으로 바뀌어버렸다. 사빈이 있어야 할 지역은 풀밭으로 변했으며, 좁게 남아 있는 사구지대는 곰솔 숲으로 변해 있었다. 과거에도 장신사구의 보전상태가 ‘양호’한 것은 아니었으나, 방조제의 완공이후에는 바다로부터 철저히 차단되어 사구의 흔적을 찾기 힘들 정도로 그 모습이 크게 변화된 것이다. 또한 잘못된 관리와 해안침식으로 인해 사구의 등급이 하락한 경우도 있었다. 예를 들면 충남 다사리 사구와 강원도 북분리 사구가 해당하였다. 이들은 해안침식이 심화되어 사구에 침식이 발생하며 줄어들고 있는 지역들이었다.



<그림 6> 새만금 방조제로 인해 고립된 장신사구

이러한 사구지대의 보전상태 하락은 지난 10년간의 해안사구 규모 변화에서도 나타나는데, 사구의 크기에 대한 분석결과(표 3), 지난 10년간 해안사구의 전체길이는 약 17%, 폭은 14% 감소한 것으로 나타났다. 해안개발의 여파로 인해 사구지대의 면적이 줄어든 것으로 확인되었다. 다만 주의할 것은 사구길이에 대한 산정방법이 달라 수치가 절대적인 것은 아니라는 것이다. 2001년 사구 길이에 대한 조사는 현지조사 후 지형도의 도상측량을 통해서 규모를 산출한 것이며, 최근의 조사는 잔존 사구지대에 대한 GPS측량 및 위성영상을 활용하여 산출한 것이다.

〈표 3〉 지난 10년간 해안사구 규모의 변화

구분		2001년	현재	변화량
(1) 규모	대	28	19	- 9
	중	45	37	- 8
	소	60	77	+17
	합계	133	133	0
(2) 평균	길이	1,287m	1,069m	17% 감소
	폭	178m	154m	14% 감소

(1) 규모 : 길이 2km이상 “대”, 1km이상 “중”, 1km미만 “소”

(2) 평균길이 =  $\Sigma(\text{사구길이})/(\text{사구수})$ , 평균폭 =  $\Sigma(\text{사구폭})/(\text{사구수})$



## 2.3 해안사구 변화의 원인

해안사구가 축소되거나 변형되는 등 변화의 원인을 살펴보면 자연적 요인과 인위적 요인들로 나눌 수 있다.

해안지역에서 일어나는 자연적인 침식으로 인해 해안선이 후퇴가 발생하고 있다. 특히, 태풍, 해일에 의한 침식이 발생한 후 사구전면부가 침식되면서 해안선입 급경하게 후퇴하는 경우가 있다. 해안사구 위에 식재한 교목들이 쓰러지면서 모래를 유실하고 사구지대로의 모래유입이 부족해지면서 사구의 면적이 축소된다. 또한 지구 온난화로 인해 해수면이 상승하면서, 해안선의 후퇴 가능성은 점차 더 증가하고 있다.

사빈으로부터의 모래공급 감소도 사구지대의 축소를 야기한다. 하천에서 공급되는 모래는 보와 댐, 하구둑 등으로 인하여 그 양이 현저하게 감소하였으며, 각종 항만 시설과 돌제 및 도류제에 의해 연안표사의 이동이 제한되고 있다. 또한 해사채취로 인해 바다모래가 감소하여 사빈이나 사구로 공급될 수 있는 모래가 부족한 실정이다.

이러한 상황에서 사구지대의 개발압력은 여전히 높다. 해안지역의 각종 개발 사업이 사구지대를 직·간접적으로 훼손시킨다. 사구지대는 과거 척박한 땅으로 버려두는 곳이 많았으나, 지속적인 개간과 해안림 조성사업으로 농경지로 변화되었다. 자온도나 임자도와 같이 서남해안의 도서들에서는 대파나 양파재배가 활발한데, 이들을 재배하는 상당수 농경지는 사구지대를 개간한 곳이다. 여기에 더하여 각 지자체들이 해수욕장의 개발이나 레저사업들을 유치하면서 사구지대를 주차장, 도로, 위락 시설 부지로 사용하면서, 사구지대의 면적이 과거에 비해 크게 감소하였다.

해안사구에 대한 잘못된 의사결정도 사구의 훼손을 야기한다. 이러한 결정의 근본적인 배경은 사구에 대한 잘못된 인식에서 비롯된다. 해안사구가 자연방파제나 중요한 서식지의 역할을 한다는 것이 알려지면서 사구보전에 대한 국민의식은 증가하였으나, 보전을 위한 정책이 오히려 사구의 훼손을 초래하는 경우가 잦다. 예를 들어, 사구지대의 보전을 도모하기 위한 해안림조성이 오히려 사구의 고유 특성을 훼손하고 장기적으로는 사구지대의 감소를 촉진하기도 한다. 일부 지자체는 사구의 지형특성을 잊은 채 해안정책을 결정하기도 한다. 사빈과 사구의 모래교환이 중요한 해안

사구지대에서 일시적으로 발생하는 사구침식을 너무 심각하게 받아들여 사구지대와 사빈 사이에 방파제나 방조제를 건설하게 되면, 사구지형의 특성이 사라지게 되어 자연회복력이 크게 약화된다. 해안사구는 자연순환과정을 통해 자기조절되고 지형경관을 유지시키지만, 인공방파제는 모래사장의 침식을 가속화시키며, 지속적으로 인위적 복구를 필요로 하기 때문이다. 모래가 있거나 초본으로 덮인 사구에 ‘소나무 숲’을 조성하기 위하여 곶술을 식재하는 것은 매우 좋지 않은 정책이다. 소나무 숲은 사구를 고정시키고 모래이동을 방해하고 사구의 자기조절기능을 저하시켜 결국에는 침식사건에 취약하게 만들기 때문이다.

## 2.4 해안사구 현황

2001년 해안사구 실태조사는 우리나라(남한)의 육지부에 분포하는 해안사구 목록을 133개 사구로 정리하였다. 이후 도서지역에 대한 조사와 사구 정밀조사를 통해 해안사구 목록을 정비한 결과, 남한 지역에는 약 200개의 사구가 분포하는 것으로 나타났다(표 4). 이 목록에서 정의하는 사구는 해안선 길이가 최소한 200미터 이상인 사구들이다. 또한, 2001년 목록에 있던 ‘삼봉사구’는 ‘삼봉사구’와 ‘기지포사구’로 분할하였으며, ‘구산사구’는 ‘구산사구’와 ‘평해사구’로 나뉘었다. 한편, ‘천리포(1)’로 표기된 지역은 더 이상 사구의 흔적을 찾기 어려워 목록에서 삭제되었다. 목록에 대한 정비 결과, 육지부에 분포하는 사구는 많은 수가 파괴되었으나, 도서부의 경우에는 비교적 보전상태가 양호한 사구들이 많았다. 비금도, 증도, 자은도, 임자도 등 면적이 큰 도서를 보유하고 있는 전남지역에 가장 많은 해안사구가 분포하는 것으로 나타났으며, 육지에 비해 보전상태가 양호하게 나타났다. 북한 지역에 대한 사구목록은 구축된 바 없으나, 위성영상으로 살펴볼 때 최소한 100여 개소 이상의 사구해안이 분포하는 것으로 추정된다. 풍성사구는 황해도 해안에 많이 발달한 것으로 추정되며, 빈제사구는 원산만 등 북한지역의 동해안에 탁월하게 발달한 것으로 보인다.

〈표 4〉 우리나라 해안사구 보전실태별 현황(2013 현재)

구분	행정구역	양호	보통	불량	계
육지 지역	강원	4	13	15	32
	경기			3	3
	경남			2	2
	경북	2	7	3	12
	부산		1		1
	인천			1	1
	전남		12	9	21
	전북		3	6	9
	제주	4	5	5	14
	충남	9	21	9	39
	소계	19	62	53	134
도서 지역	인천	4	12	2	18
	전남	11	26	7	44
	충남	1	3		4
	소계	16	41	9	66
총 계		35	103	62	200

### 3. 해안사구의 기능

해안사구는 생태적으로 매우 중요한 지형이다. 해안에서 발생하는 여러 가지 자연 재해로부터 배후지역을 보호하는 한편, 희귀한 동식물이 서식할 수 있는 환경을 제공한다. 사구가 갖는 다양한 기능은 해안사구의 자연적인 특성을 이해하는 것은 물론, 보전에 대한 이유를 제공한다. 사구의 주요 기능을 요약하면 다음과 같다.

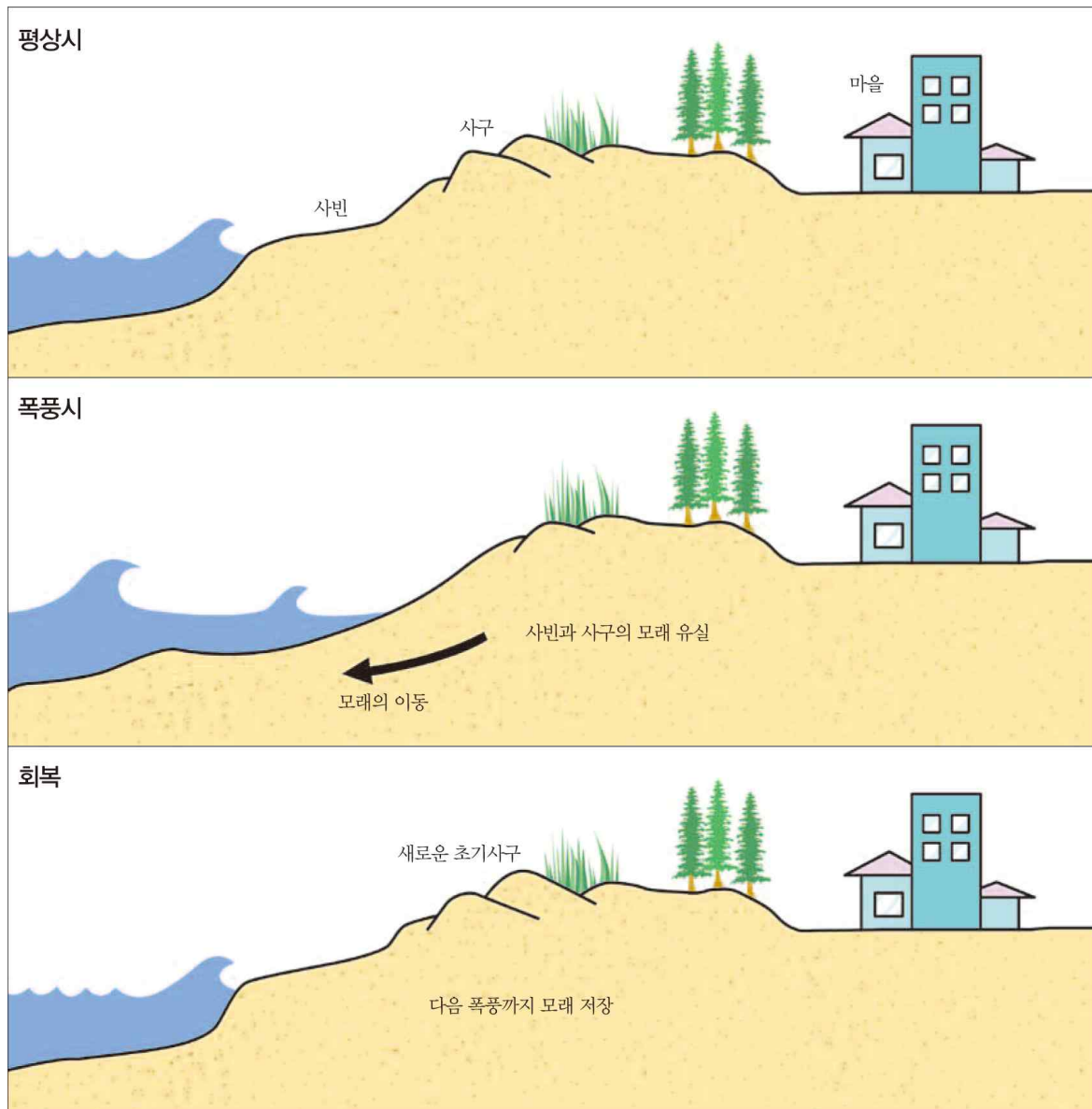
#### 3.1 모래의 저장

해안사구는 바닷가의 모래가 저장되는 곳이다. 바람에 의해 이동된 모래가 쌓였다가 폭풍으로 사빈의 모래가 깎여나가면 사구의 모래가 이동되어 자연스럽게 경관이 회복되도록 하는 기능을 한다. 또한 이러한 과정에서 육지와 바다의 모래가 교환되며 영양소를 포함한 물질의 교환도 발생한다. 주의해야 할 점은 바람에 의해 사빈의 모래가 사구로 이동하기 위해서는 적절한 풍속이 있어야한다는 점이다. 만일 사구에 건물이나 방풍림을 조성하면 풍속이 약해져서 사빈의 모래가 사구로 이동하지 않는다.

#### 3.2 자연방파제

사구로 이루어진 해안은 파랑에너지를 분산시키고 충격을 흡수하는 방파제의 기능을 한다. 이것은 콘크리트 같은 고정시설물보다도 훨씬 높은 효율성이 있어 폭풍이나 해일과 같은 자연재해 발생 시 그 피해를 완화시키는 역할을 한다. FEMA는 10년 빈도의 고조위 이상에 50m<sup>2</sup>의 모래축적 단면적이 있는 사구가 100년 빈도의 폭풍에 견딜 수 있는 것으로 추정하였다(FEMA, 1995). 이러한 기능의 증진을 위하여, 미국 뉴저지 주에서는 사구울타리와 사구식물식재를 통하여 인공적인 사구 조성을 추진하고 있다(유근배 역, 2008). 특히 앞으로 예측되는 기후변화에 따른 해수면 상승에 대비하기 위해서는 사구와 같은 자연방파제의 유지가 매우 필요하다.





〈그림 7〉 사구의 모래저장 기능이 자연방파제의 역할을 하게 한다.

### 3.3 담수 보호 및 지하수 저장

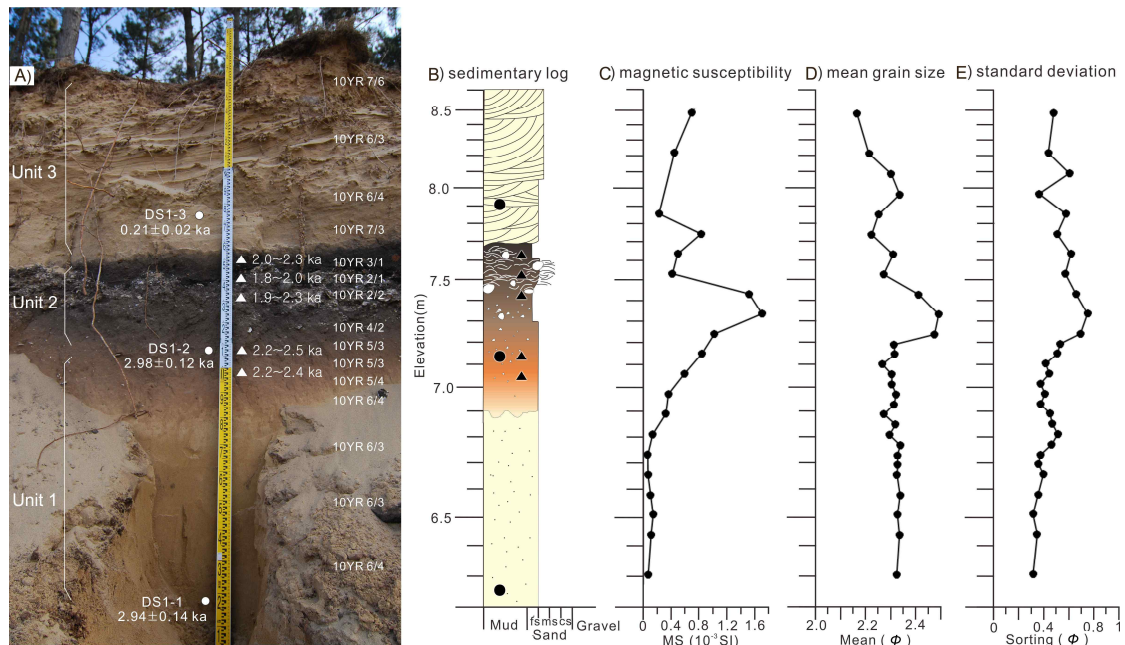
해안사구는 바다에 접한 육지의 울타리와 같다. 모래언덕으로 높아진 육지는 지하수위를 높이는 구실을 하며 해수는 담수의 아래에 위치하기 때문에 사구는 해수의 침입을 막는 역할을 한다. 이렇게 저장된 지하수는 모래틈새로 걸러져서 해안지역에 거주하는 사람과 서식하는 생물의 물 공급처로서 기능한다. 하지만 지나친 담수의 개발은 사구의 지지력을 약화시킨다. 해수욕장 개발 등을 이유로 관정을 설치한 곳에서는 담수의 고갈로 인해 바닷물이 나오기도 한다.

### 3.4 사구성 동식물 서식처

사구는 육지나 바다와는 다른 생태환경을 제공한다. 염분의 농도가 높고 바람이 강하며, 증발량이 많다. 이러한 척박한 환경은 사구환경에 적응한 독특한 생물들만이 사구에서 살아갈 수 있게 해준다. 갯그렁, 통보리사초, 해당화를 비롯한 사구식물과 모래거저리, 왕명주잠자리, 참뜰길앞잡이 등의 사구성 곤충은 해안사구를 터전으로 살아간다. 멸종위기종인 표범장지뱀은 서해안 해안사구에 주로 분포하며 흰물떼새는 해안사구의 모래땅에 둥지를 만든다. 이와 같이 해안사구는 육지나 해양의 경계부에 형성된 점이지대로서 독특한 생태계를 이루며, 국가적인 차원에서 생물다양성을 높이는데 기여하고 있다.

### 3.5 고환경 기록

사구는 특정기간 동안 모래가 쌓여서 만들어진 지형으로 퇴적층 내에 다양한 환경 기록을 저장시킨다. 여기에는 기후변화와 해수면 변동, 생물상에 대한 기록들이 포함된다. 사구연구자들은 사구에 기록된 모래입자의 변화, 생물화석, 지화학적 지시자 등의 복원을 통하여 과거 환경 변화를 유추할 수 있다. 예를 들어, 최근 발견된 다사리 해안의 퇴적층은 최소 2000년 전에 일어났던 폭풍기록을 보여주는 것으로 나타났다(최광희 등, 2014). 이러한 정보는 미래 기후변화로 인해 해안에서 나타날 수 있는 폭풍의 규모를 가늠하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.



〈그림 8〉 사구에 기록된 과거의 폭풍퇴적층 (최광희 등, 2014)

### 3.6 경관 자원

해안사구가 있는 모래해안은 대체로 훌륭한 자연경관을 이룬다. 이러한 지역은 휴식과 여가의 장소로서 가치가 높다. 따라서 사구가 위치한 해변은 보통 해수욕장으로 이용되곤 한다. 만일 고정시설물을 설치하지 않고 사구해안을 적절히 이용할 수만 있다면, 사구해안은 지속가능한 휴식처가 될 수 있을 것이다. 특히, 최근 들어 생태관광 또는 체험관광이 인기를 얻으면서 사구지대는 해수욕장의 부가적인 목적에서 벗어나 그 자체로서도 중요한 관광자원이 되고 있다. 예를 들어, 천연기념물로 지정된 신두리해안사구 지역은 사구를 찾는 사람들이 늘면서 사구센터가 건립되기도 하였으며, 대청도 옥죽동 사구는 대청도를 찾는 관광객들에게 ‘모래사막’으로 알려지는 등 매우 중요한 볼거리가 되었다.

## 4. 사구의 자연 순환 과정

전사구와 사빈은 파랑과 바람에 의해 활발하게 모래를 교환한다. 또한 유기물과 염분 등 양분의 교환도 발생한다. 이러한 교환과정을 비롯하여 사빈과 사구 사이의 유기적 반응체계를 사빈-사구 상호작용(beach-dune interaction)이라고 부른다. 사구 지대에서는 이러한 사빈-사구 상호작용 이외에도 전사구와 배후사구의 순환, 연안류에 의한 표사의 이동 및 순환 등 매우 복잡한 자연 순환 과정들이 존재한다.

### 4.1 모래의 퇴적과 침식

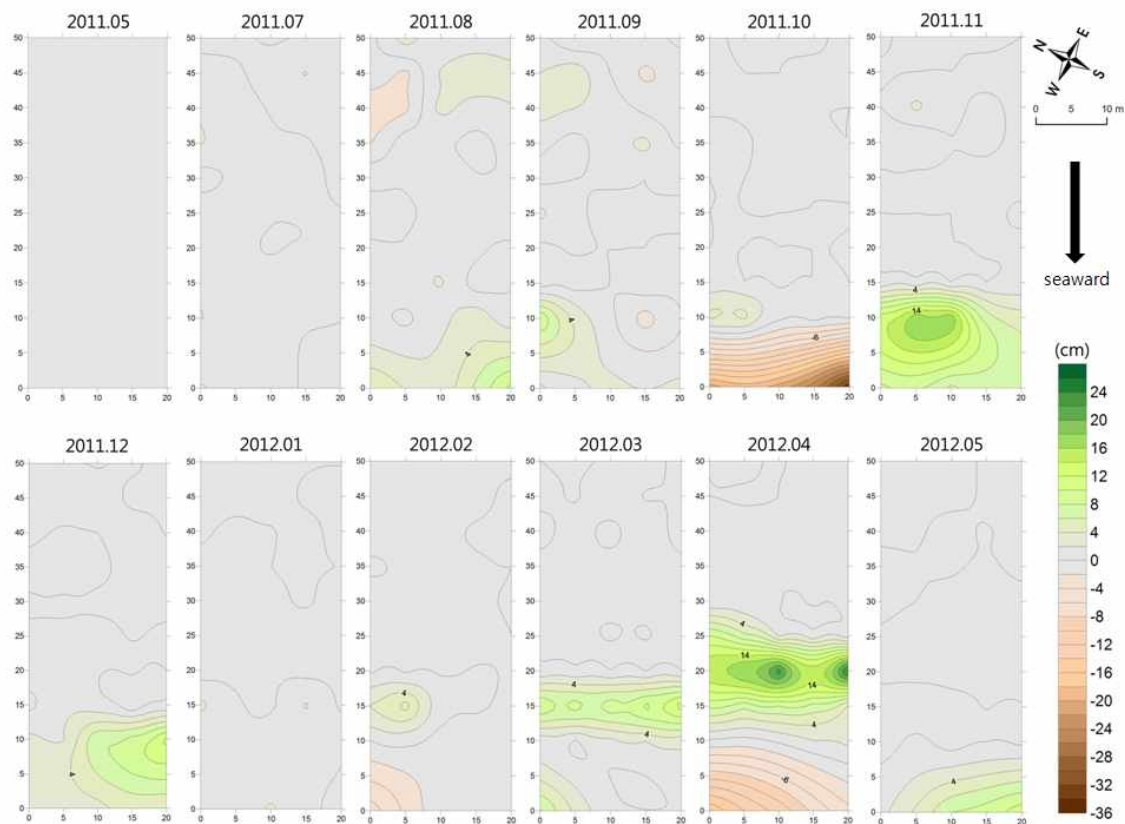
일반적으로 ‘모래(sand)’란 0.63~2mm인 광물 입자를 말한다. 모래보다 작은 입자로는 미사(silt)와 점토(clay)가 있으며, 모래보다 큰 입자를 ‘자갈(gravel)’이라 한다. 해안사구를 구성하는 모래는 서해안의 경우 주로 200~300 $\mu$ m 정도의 크기를 갖는데, 모래를 크기별로 분류할 때 ‘가는모래(fine sand)’에 해당한다. 동해안의 해안사구 모래는 이보다 굵은 것이 보통이다.

사구를 구성하는 모래의 특징 중 하나는 모래가 매우 균일하다는 것이다. 사빈의 모래가 일정한 세기의 바람에 날려 일정한 거리에 쌓여 해안사구를 형성하기 때문이다. 사구모래의 구성 성분은 보통 이산화규소( $SiO_2$ )로 이루어진 광물인 석영(Quartz)이 90% 이상을 차지하는데, 다른 광물에 비해 침식과 풍화에 강하기 때문이다. 석영이 풍부한 규사(珪砂)는 유리의 원료로 사용되기 때문에 그 동안 많은 해안사구가 규사채취를 이유로 파괴되기도 하였다. 한편 화산암으로 이루어져 있어서 석영이 거의 없는 제주도의 경우, 조개껍데기로 이루어진 패사(貝砂)가 사구의 주요한 구성물질이 된다.

풍성사구의 경우, 사빈에서 사구로의 모래이동은 대체로 바람에 의해 발생한다. 2m 높이의 바람을 기준으로 할 때, 약 4m/s이상의 풍속을 지닌 바람이 해안에서 내륙으로 불 때, 건조한 사빈 표면의 모래가 육지로 이동하며(Bagnold, 1941; Hsu and Weggel, 2002), 이동방식은 대체로 도약운동(saltation)을 따른다. 만일 지면에 식생이 분포하여 지면의 거칠기가 클 경우, 모래를 움직이기 위한 바람의 세기는 더 커져야

한다. 따라서 우리나라 서해안의 경우, 강한 북서풍이 지속적으로 불고 비교적 건조한 겨울~봄 사이에 사구지대에 모래공급이 활발하게 나타난다(그림 9).

사구에서 사빈으로의 모래이동은 바람에 의해 발생하기도 하지만 대부분의 경우에는 파랑에 의해 사빈이 소실되거나 사구의 전면부가 침식될 경우에 발생한다. 조차가 큰 서해안의 경우 대조기에 침식가능성이 매우 높아지며, 태풍이 통과하거나 돌풍이 불어올 때 해안침식이 발생한다. 이러한 침식은 일시적으로 사구의 침식으로 여겨질 수도 있으나 궁극적으로는 사빈-사구에서 발생하는 자연적인 모래순환과정의 일부일 뿐이다.



<그림 9> 보령 소황사구의 월별 지형변화량 (정필모 등, 2012)

## 4.2 식생의 역할



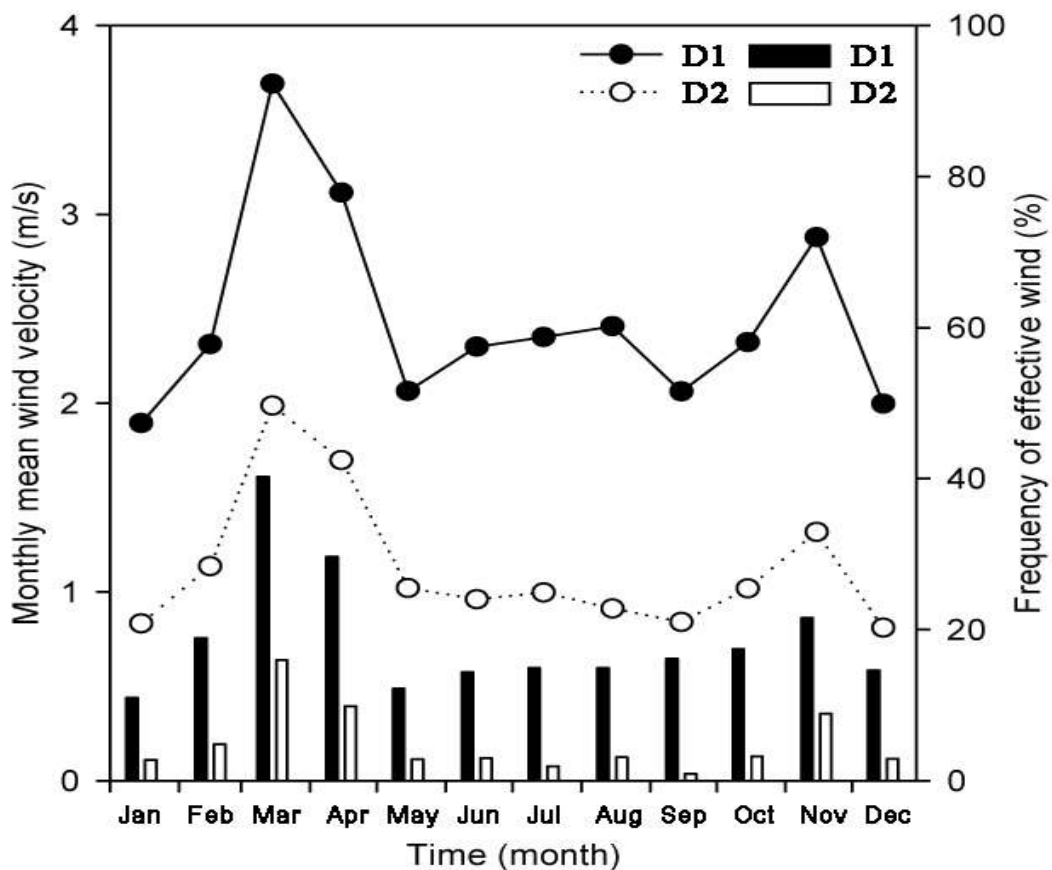
해안사구를 형성하는 파랑, 바람, 모래 공급량, 기후 등의 요인에 의하여 사구는 시시각각 변화하는 동적인 생태계이다. 사구는 계절별로, 연별로 모양과 높이 등이 달라지며 이에 정착하고 살아가는 식물은 사구의 동적인 환경에 적응해왔다. 사구식물은 대부분 여러해살이이며 뿌리줄기나 기는줄기의 생장이 탁월하다. 사구의 지형 변화에 따라 줄기를 뺏어 서식지를 확장해 나가는데, 뿌리줄기를 수평방향으로 뺏고 여기에서 새로운 개체를 발생시키는 영양생식을 전략으로 삼는 사구식물들이 많다. 또한 사구식물은 대부분 잎이 넓거나 두꺼우며 종자의 껍질이 단단한 경우가 많다. 이러한 생존전략은 모두 사구의 혹독한 환경과 관련이 있다.

사구식물은 변화하는 지형에 적응할 뿐 아니라 사구의 형성과정에 기여한다. 바닷가에서 공급되는 모래는 부유, 도약, 끌림 등 세 가지 형태로 사구로 이동되는데, 모래의 크기와 바람의 강도에 따라 달라진다. 바람에 의해 운반되던 모래는 풍속이 감소하는 지점에서 쌓이게 된다. 이때 사구식물은 풍속을 감소시키는 중요한 인자로서 작용한다. 이렇게 형성된 모래에 새로운 식물개체가 형성되고 다시 이러한 식물체 주변에 모래가 쌓이면서 사구가 성장하게 된다. 특히 사구식물의 뿌리와 뿌리줄기는 사구모래의 유실을 방지하며, 지상부에 있는 줄기와 잎은 풍속을 감소시켜 바람의 침식력을 저하시켜 사구의 안정을 유도한다. 그러나 사구식물이 너무 밀생하게 되면 모래공급이 차단되어 사구의 생장이 멈추거나 퇴보할 수도 있다.

해안사구에는 사구의 독특한 환경에 적응한 식물들이 서식한다. 어떤 식물이 어느 곳에, 어떤 형태로 분포하는가는 그 식물이 처한 환경을 그대로 반영한다. 사구에 사는 식물군집은 주로 해안선과 나란한 띠 형태로 분포하는, 대상 분포(帶狀分佈)가 나타난다. 환경의 영향과 다른 종과의 상호작용으로 정해지는 각 종의 분포범위를 생태적 지위(ecological niche)라고 하는데, 사구에서의 이러한 대상 분포는 해안사구의 생태환경을 반영하는 것으로, 각 종이 가지는 생태적 지위가 서로 다름을 나타낸다. 사구는 해안에서부터 내륙 방향으로 풍속, 염분, 수분 등 환경인자의 구배(gradient)가 발생한다. 이에 따라 해안에 가까운 해빈근처, 전사구의 바람받이사면, 사구정상부, 바람그늘사면, 사구저지, 배후사구에 서식하는 생물의 종과 형태가 달라진다.

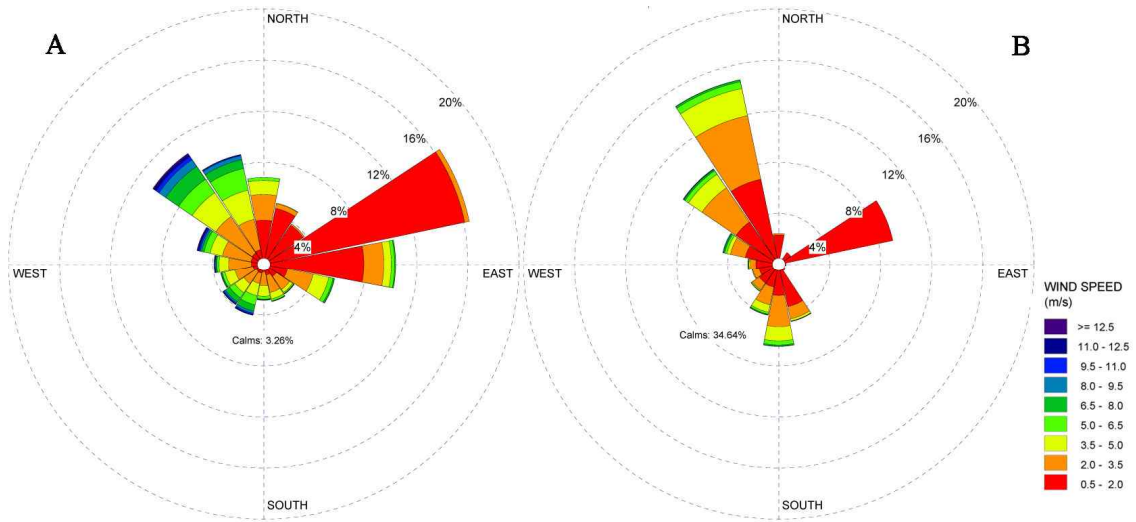
#### 4.3 해안림에 의한 자연순환의 교란

방풍 및 방사를 목적으로 식재하는 곰솔이나 아까시나무 같은 키 큰 나무들은 사구를 안정화시키는 것처럼 보이지만 실제로는 해안의 후퇴를 가속시킨다. 대조기의 고조기에 발생하는 침식으로 인해 사구전면부가 침식될 때, 자연 해안사구에서는 그것이 스스로 회복되지만 해안림이 조성된 곳에서는 회복력이 저하되기 때문이다(최광희 등, 2012). 이러한 회복력의 저하는 주로 교목으로 인해 풍향이 바뀌고 풍속이 감소하면서 모래가 사구지대 내부로 이동할 수 없기 때문에 발생한다(그림 10).



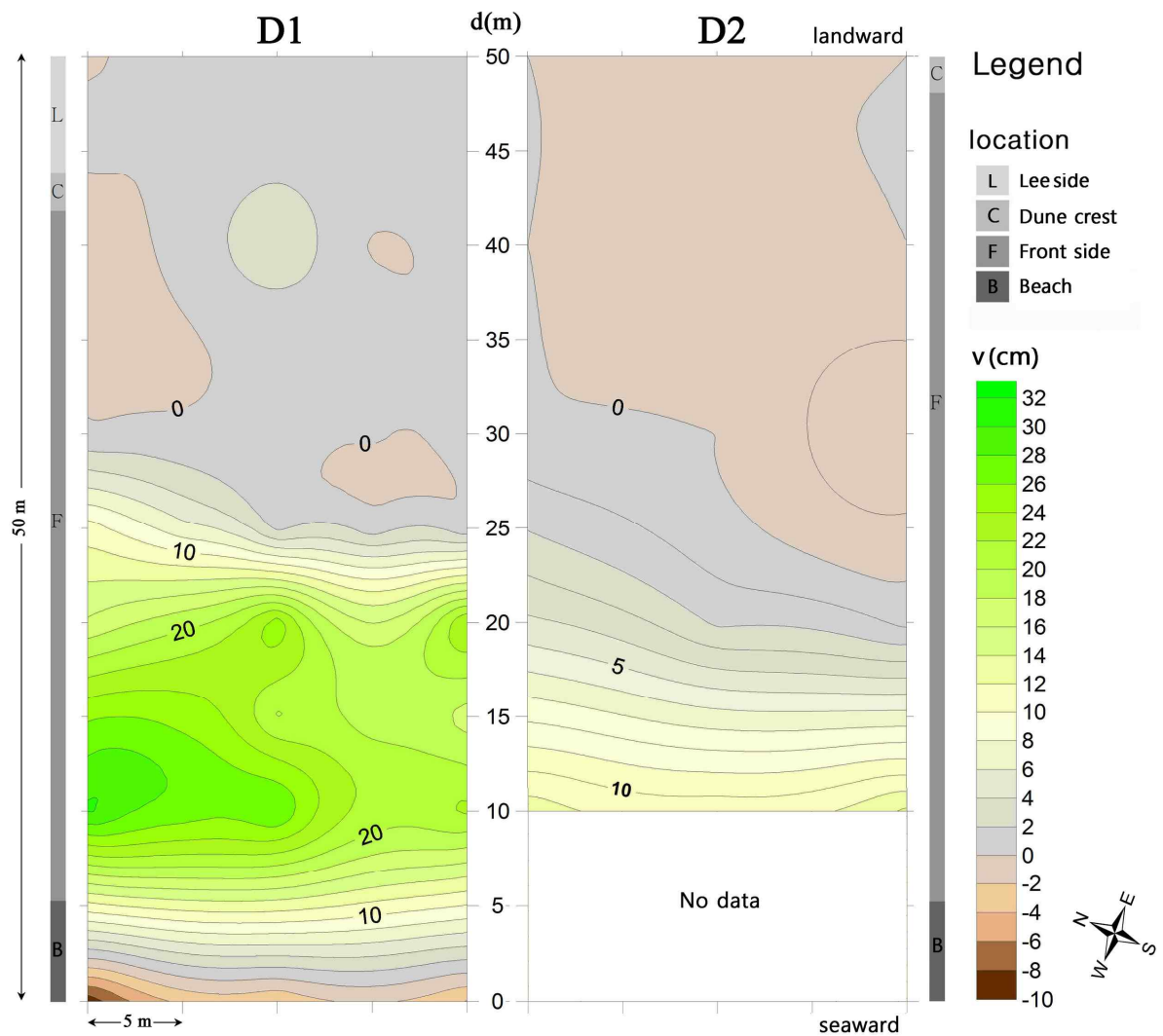
〈그림 10〉 초본피복 사구(D1)와 곰솔림 전면(D2)의 풍속비교 (Choi et al., 2013)

서해안에서 부는 전형적인 바람은 겨울철을 중심으로 불어오는 북서계절풍이다. 하지만 곰솔림이 뺏뺏하게 조성된 보령 소항사구의 북쪽해안에서는 해안림과 나란한 북북서 방향의 바람이 우세하게 나타났다(그림 11). 이로 인해, 바다에서 육지 쪽으로 이동해야 할 모래가 북쪽에서 남쪽해안으로 이동하였다. 그 결과, 모래가 퇴적되는 구간은 만조선에서 불과 10m 이내로 제한되었다. 이것은 초본피복지대에서 나타나는 퇴적폭(약 25m)에 비해 현저히 좁은 것이었다(그림 12).



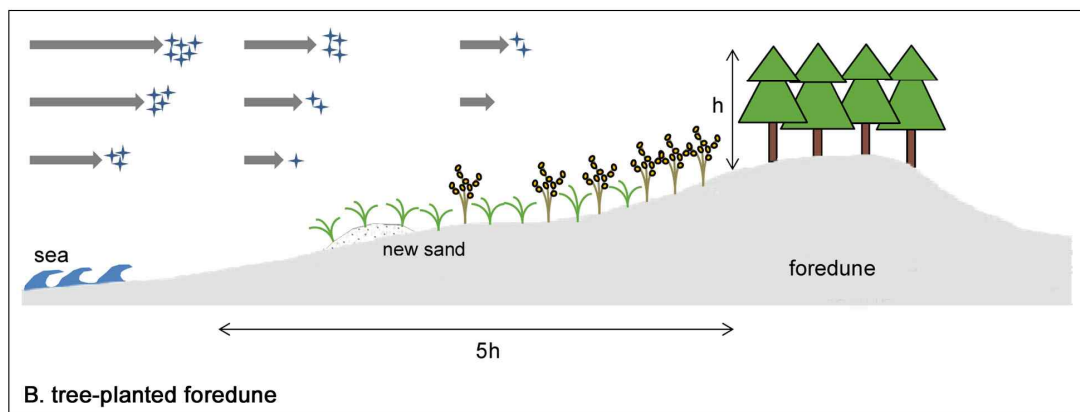
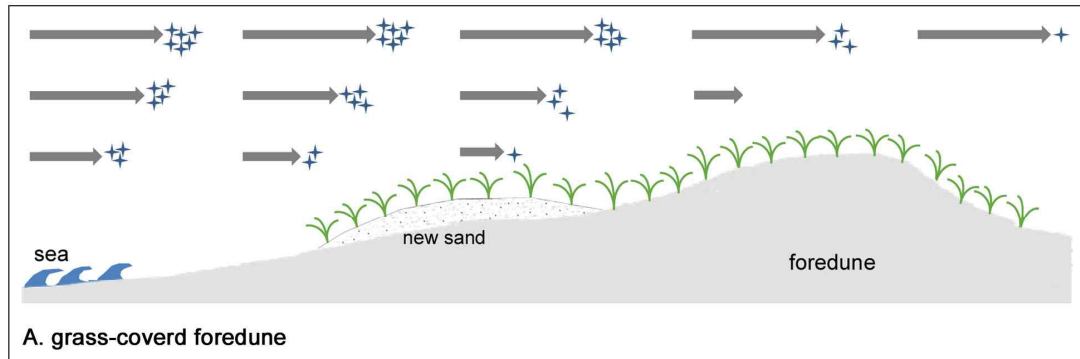
〈그림 11〉 정상적인 바람장미(A)와 해안림으로 왜곡된 바람장미(B) (Choi et al., 2013)

교목의 식재는 바람의 감소와 모래퇴적량의 감소 이외에도 해안으로부터 불어오는 비염(salt spray)의 감소를 초래한다. 해안방재림(또는 방풍림, 방사림 등)의 목적 중 하나가 염해를 막기 위한 측면도 있었기에 비염의 감소는 어쩌면 의도한 결과일 수도 있다. 하지만 해안림 앞의 비염감소는 모래와 풍속 감소와 더불어 사구 생태계에 또 다른 교란을 야기한다. 그것은 비사구성 식물의 유입을 초래하여 사구의 유연성을 감소시키는 것이다. 사구성 식물은 염분과 모래매물, 강풍과 같은 척박한 환경에 잘 적응하기 위하여 전체적으로 키가 작고 뿌리줄기나 기는줄기를 생존전략으로 삼는 경우가 많다. 이러한 특성은 사구모래의 퇴적을 촉진하는 역할을 한다. 이에 비해, 비사구성 식물들은 그렇지 못하다. 따라서 사구에 비사구성 식물이 대규모로 유입되는 것은 사구의 고유성을 떨어뜨리는 결과를 초래하고 궁극적으로 해안침식과 같은 사건에서의 자연회복력 감소로 이어진다.



〈그림 12〉 초본피복 사구(D1)와 곰솔림 전면(D2)의 모래퇴적 비교 (Choi et al., 2013)

국립환경과학원에서 지난 4년간 정기적으로 조사한 보령 소황사구의 경우, 곰솔림 전면부의 식물종수는 초본지역의 약 3배에 달하였다. 이러한 결과는 곰솔의 식재와 비료목으로 심은 아까시나무의 식재, 그리고 이 과정에서 유입된 외부토양 등에 일차적인 원인이 있으며, 곰솔과 아까시나무의 성장 이후 변화된 해안환경에 이차적인 원인이 있을 것으로 추정되었다. 모래와 염분의 감소가 비사구성 식물의 유입에 기여한 사례라 하겠다. 따라서 사구 위에 조성하는 해안림은 서해안과 같은 풍성사구 환경에는 맞지 않는 정책으로 판단되며, 해수면 상승이 예견되는 상황에서는 더욱 지양해야 할 것이다.



< Legend >

+ salt spray    → wind    new sand    dune grass    nonnative plant    pine tree

<그림 13> 자연적인 사구(위)와 해안림이 조성된 사구(위)의 생태특성 비교 (Kim et al., 2014)



## 5. 자연순환에 기반한 복원 및 보전 전략

자연의 순환과정을 무시한, 인위적인 조치들은 반드시 여러 가지 부작용을 낳기 마련이다. 방파제는 사구 전면부의 침식을 방지하는 것처럼 보이지만 사빈의 유실을 야기하고 더 큰 사구침식을 발생시켜 자연경관의 질을 저하시킨다. 또한 해안선과 평행하게 배치하는 이안제나 수직으로 배치하는 돌제 등은 특정 지역의 모래퇴적을 유도하지만, 연안류를 변화시켜 인근 지역에는 침식을 증대시키는 부작용이 있다. 이러한 부작용들은 때때로 더 큰 재해의 원인이 되기도 한다. 따라서 해안지형에 대한 보전 및 복원 정책을 수립할 때는 반드시 해안에서 일어나는 자연순환과정을 고려할 필요가 있다. 이를 보다 자세하게 논의하고자 한다.

### 5.1 복원대상지에 대한 선정

훼손된 사구에 대한 복원은 모든 지역에 필요하다. 하지만 한정된 자원을 효율적으로 사용하기 위해서는 적절한 기준에 따라 복원순위를 선정할 필요도 있다. 보전 지역을 지정하기 위한 대상지 선정에는 사구의 규모나 전형성, 생태적 중요성 등을 고려할 수 있다. 하지만 복원대상지를 고려할 때는 사구의 해안방어 기능과 향후의 지속가능성을 더 중요하게 고려해야 한다.

해안사구는 강한 폭풍과 해일 등 자연재해로부터 육지를 보호하는 호안(coastal defense)의 역할을 한다. 따라서 사구가 있는 해안은 그렇지 않은 곳에 비해 보다 안전하다. 이런 이유 때문에 프랑스나 덴마크에서는 이전에 없었던 해안사구를 새로 조성하기도 하였다(Doody, 2013). 하지만 진흙갯벌로 이루어진 해안에 사구를 조성하는 것은 바람직하지 않다. 해수면의 상승으로 인해 침식위험이 증가하고 있어 지속가능성을 담보할 수 없기 때문이다. 사구 복원에 유리한 곳은 다량의 모래를 보유한 사빈이 있고 강한 해풍이 지속적으로 불며 과거에도 사구가 있었던 지역일 것이다.

### 5.2 모래퇴적의 촉진

침식이 발생하는 사구에 대한 복원방안은 모래의 퇴적을 촉진시키는 것이다. 이를 위해서는 모래의 이동 및 퇴적과정을 잘 이해하고 응용해야 한다. 앞서 살펴본 것처럼 직경이 약 0.2mm인 해안사구 모래가 바람에 의해 이동되기 위해서는 지상 2m 높이에서 약 4 m/s의 바람이 지속적으로 불어야 한다. 또한 서해안의 경우 사빈에서

사구로 모래가 이동하기 위해서는 서풍 계열의 바람이 불어야 한다. 이런 조건을 만족하는 바람은 겨울철에서 봄철까지 주로 나타난다. 이동하는 모래가 퇴적되기 위해서는 적절한 장애물이 필요하다. 여기서 말하는 적절한 장애물이란 너무 높지도 너무 성글지도 너무 조밀하지도 않은 것을 의미한다. 이른 봄, 사구에서 발아하여 성장하는 식물들은 이러한 조건에 잘 부합한다.

‘모래 포집기(또는 사구울타리, sand fence)’는 사구식물에 의한 퇴적과정을 모방하여 모래퇴적을 촉진시키는 방법으로 사구지대에서 흔히 사용되고 있다. 국립공원관리공단에서는 지난 2001년 일(一)자형, 그물형, N자형, 지그재그형 등 여러 가지 형태의 포집울타리의 성능을 시험한 후 대나무로 만든 지그재그형 모래 포집기를 최종적으로 선정하여 해안사구복원사업지역에 설치하였다. 일반적으로 모래포집의 효율은 포집기의 종류와 그것이 가진 공극에 좌우된다. 만일 울타리의 빈 공간이 20% 미만이라면, 바람에 대한 방벽의 역할을 하기 때문에 모래포집기로서 적합하지 않다. 여러 사구연구자들의 모래포집 실험 결과를 종합할 때, 36~40%의 공극을 갖는 울타리가 그 배치구조와 관계없이 가장 효율이 높다고 한다(Pye and Tsoar, 2008).

훼손된 지역에 사구식물을 식재하는 것도 사구를 안정화시키고 모래포집을 촉진하는 방법이 될 수 있다. 유럽에서는 오래전부터 ‘Marram grass’와 같은 벼과의 사구식물을 침식된 지역에 심어왔다. 우리나라에는 갯그령이 이 식물에 대응하는 종이다. 따라서 갯그령의 식재를 통해 사구지대의 안정과 모래의 퇴적을 촉진할 수 있을 것이다. 하지만 식생의 밀도가 너무 높은 경우에는 오히려 풍속을 감소시켜 모래의 이동을 저해할 수 있으니 주의가 필요하다. 참고로 Marram grass에 대한 식재는 만조선에서 2~3m 이내에서는 식재를 하지 않는 것이 좋고 뿌리줄기를 함께 심는 것이 더 효율적이라고 한다.

### 5.3 적절한 식생

해안사구는 육지와 바다의 경계에 있는 지형으로 고유한 생태계가 존재한다. 이 생태계는 국가적 차원의 생물다양성 측면에서도 중요하지만, 사구의 유지에 있어서도 매우 중요하다. 예를 들어, 해안사구에 흔하게 나타나는 갯그령이나 통보리사초 군락에서는 각 개체가 뿌리줄기로 서로 연결되어 사구지대에 그물망을 씌운 것 같

은 역할을 한다. 모래의 침식과 퇴적에 따라 성장과 쇠퇴를 반복하면서 사구경관을 유지시킨다. 이에 비해 비사구성 식물들은 사구토양을 산성화시키고 사구지형의 유연성을 저해한다. 따라서 사구에 침입한 비사구성 식물들은 적절하게 관리될 필요가 있다.

최근 사구지대에 조성한 해안림이 오히려 사구지대의 침식을 가속화시키고 있는 경향이 있다(Choi et al., 2013). 곰솔과 함께 도입된 아까시나무 등의 비사구성식물에 의해 사구의 생태계가 교란되면서 사구의 자연회복력 또한 크게 약화되고 있다(Kim et al., 2014). 외국의 경우, 식생의 밀도가 너무 높은 지역에서는 소나 토끼 등을 방목하여 섭식(grazing)을 유도하거나, 도구를 이용하여 풀을 깎아주는 제초작업을 진행하기도 한다. 또한 관목림이나 교목림에 대해서는 불도저 같은 장비를 이용하여 대규모로 제거하는 활동도 하고 있다(Doody, 2013).

이러한 직접적인 방법보다는 효율이 떨어지지만, 사구에서 일어나는 자연순환과정을 이용하는 간접적인 방안도 고려할 수 있다. 사구식물들이 사구환경에 적응하며 갖게 된 생존능력을 이용하는 것이다. 일반적으로 대부분의 사구식물들은 모래매몰에 대한 적응력, 염분에 대한 일정 수준의 내성, 강풍에 대한 저항력들을 갖고 있다. 따라서 인위적인 요인에 의해 모래퇴적이 감소한 곳에서는 모래를 뿌려 주거나(Kodama, 2006), 비염이 줄어들어 침입종이 확산되는 곳에는 해수를 분사함으로써 비사구성식물을 선택적으로 제어할 수 있다. 아직까지 이들 방법이 구체적으로 제안된 것은 아니지만, 인위적으로 변형된 자연지형을, 최대한 자연에 가깝게 복원할 수 있는 방안이 될 것으로 기대한다.

## 5.4 사구의 지형다양성

방파제 건설이나 해안림 조성은 사구의 경관을 획일화시키는 결과를 초래한다. 이러한 정책들은 사구가 갖고 있는 본연의 유연성을 감소시키고 사구생태계를 변형시키고 단순화시키는 교란요인으로 작용한다. 서해안 사구의 경우, 곰솔림이 대규모로 조성되기 전에는 해안을 따라 발달한 전사구 위에 바람의 취식에 의해 만들어진 취식와지(blow out)가 나타나고 사구마루 후면의 낮은 부분에 사구습지가 분포하며 배후사구로 이어지는 형태로 사구가 발달하였다. 이렇게 다양한 미지형이 발달한 사구는 보다 많은 생물이 서식할 수 있는 환경을 제공하는 동시에, 기후나 해수면의 변

화에 반응할 수 있는 지형의 유연성을 확보하는데 기여한다. 그러나 무차별적인 해안립의 조성으로 인해 대부분의 해안사구는 현재 본래의 형성과정과 관계없이 형태나 구조가 비슷하고 해안침식에 매우 취약한 구조로 바뀌었다(최광희 등, 2012).

해안사구, 특히 전사구는 사빈과의 물질교환을 통해 지형 및 식생 경관을 유지한다. 따라서 사빈-사구 상호작용이 활발하게 일어날 수 있도록 관리하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 가급적 경성호안구조물(hard coastal defense)을 설치하지 않도록 해야 한다. 사빈침식에 의해 모래가 유실되는 해안에서는 적절한 양의 모래를 공급하는 양빈(beach nourishment) 기법을 적용할 수 있으며, 이것은 궁극적으로 사구지형의 회복을 촉진시킬 수 있다.

## 5.5 모니터링

훼손된 해안사구를 복원하거나 우수한 해안사구를 잘 보전하기 위해서는 적절한 방법에 의한, 지속적인 모니터링이 필요하다. 해안사구에 대한 모니터링은 풍향 및 풍속에 대한 자료 수집, 모래의 침식 및 퇴적량 조사, 식생을 포함한 생태계 변화 관찰 등으로 나뉜다. 특히, 각 시기별 풍향 및 풍속 자료와 사빈과 사구의 모래 정보는 침식된 사구를 복원하는데 있어서 매우 중요하다. 모래퇴적을 유도하기 위해서는 해안으로 모래공급이 가장 활발한 계절의 직전에 모래포집용 울타리를 설치하는 것이 바람직하기 때문이다. 예를 들어 지난 5년간 모니터링한 보령 소황사구의 경우, 가장 적절한 바람이 부는 시기는 매년 2월에서 4월까지이며 주풍향은 북서방향인 것으로 분석되었다. 이 시기에 초본지대의 경우 만조선에서 약 30m까지 모래가 퇴적되는 것으로 나타났다. 따라서 만일 소황사구의 훼손지를 복원하고자 한다면 11월 경에 모래 포집기를 설치하고, 일자형의 모래 포집기를 설치할 경우에는 북서방향에 수직이 되도록 배치해야한다고 말할 수 있다.

## 6. 결론

기후변화로 인해 해수면이 상승하면서 해안재해가 점점 더 증가되는 상황에서 해안사구에 대한 관리정책은 해안지역에 거주하는 주민의 안전과 직결된다. 따라서 방어기능이 우수한 사구를 보전하고 훼손된 사구를 복원하는 일은 유실된 도로나 제방을 복원하는 것처럼 당연시되어야 한다. 그러나 선부른 관리정책은 사구 보전에

역효과를 일으킬 수 있다. 사구경관을 안정화시키고 자연재해를 줄이기 위해 조성한 곰솔림이 오히려 자연회복을 저해하여 해안침식을 가속화시키고 있음을 유념해야 한다.

해안지역에 대한 계획에는 반드시 해안에서 발생하는 자연순환과정에 기반을 둔, 신중한 의사결정이 필요하다. 즉 적절한 사구관리대책을 수립하기 위해서는 해안사구의 모래이동과 침식 및 퇴적과정 등 사구의 지형형성과정에 대한 이해가 수반되어야 한다는 것이다. 이를 위해서는 사구 구성 물질과 형태에 대한 세밀한 조사와 지형과 식생에 대한 정기적인 모니터링, 바람에 대한 충분한 자료의 수집이 필요하다. 해안사구에 대한 보전 또는 복원 계획은 이러한 자료들을 충분히 확보하고 미래의 해안환경변화까지 고려하여 수립하는 것이 바람직하다.



## 참고문헌

- Bagnold, R. A., 1935. The movement of desert sand. *Geographical Journal*, 85(4), 342-365.
- Choi, K. H., et al., 2013. Adverse Effect of Planting pine on coastal dunes, Korea. *Journal of Coastal Research* SI65: 909-914.
- Doody, J.P., 2013. *Sand Dune Conservation, Mangement and Restoration*. Springer. 303p.
- Hsu, S., and Weggel, J., 2002. Wind-blown sediment transport. *Coastal Engineering Manual*, Part IV.
- Kim, Y., Choi, K.W., Jung, P.M., 2014. Changes in foredune vegetation caused by coastal forests. *Ocean & Coastal Management*. 103-113.
- Kodama, Y., 2006. Multi-scale Countermeasures for Meadow Overgrowth at Tottori sand dune. (in Japanese)
- Pye, K., and Tsoar, H., 2008, *Aeolian sand and sand dunes*, Springer, 396p.
- 유근배 (역), 2008, *해안위험관리*, 한울, 503p. (Psuty, N., Douglas, D., and Ofiara, D., 2002, *Coastal Hazard Management : Lessons and Future Directions from New Jersey*).
- 정필모, 최광희, 김윤미, 2012. 보령 소항리 전사구의 계절별 지형변화 특성과 그 의의. *한국지형학회지*. 19(4). 109-122.
- 최광희 · 김윤미 · 정필모 · 서민환, 2011, *자연방파제 해안사구*, 국립환경과학원.
- 최광희 · 최광용 · 김윤미, 2014, 태풍 불라벤에 의한 제주도 방풍림 조풍 피해, *대한지리학회지*, 49(1), 18-31.
- 최광희, 정필모, 김윤미, 서민환, 2012. 태풍의 통과로 인한 해안사구 지형의 침식과 회복. *한국지형학회지*, 19(1). 17-27.
- 환경부, 2001. *우리나라 사구 실태파악과 보전 관리방안에 대한 연구*.