

## 기상풍황자료 통계적 분석을 통한 한국형 해상풍력터빈 설치지점 선정 최적화 연구

이 기학<sup>1)</sup>, 전 상욱<sup>2)</sup>, 구 요천<sup>3)</sup>, 박 경현<sup>4)</sup>, 이 동호<sup>5)</sup>

### Numerical Optimization of Foundation place for Domestic Offshore Wind Turbine by using Statistical Models for Wind Data Analysis

Ki-Hak Lee, Sang-Ook Jun, Yo-Cheon Ku, Kyung-Hyun Pak, and Dong-Ho Lee

**Key words** : Offshore HAWT(해상용 수평축풍력터빈), Optimization(최적화), Statistical Model  
(통계적 모델), Kriging Method(크리깅 기법), Genetic Algorithm(유전알고리즘)

**Abstract** : 현재 국내에서 운용중인 풍력발전시스템은 국내 풍력자원에 대한 정확한 정보의 부재와 국내 풍황에 맞지 않는 국외 모델을 그대로 운용하는 등의 몇 가지 문제를 드러내었다. 본 연구의 목적은 국내 연안의 해상에서 한국형 해상풍력터빈을 설치하기 위한 잠재적 최적위치와 풍황자료 산출 최적화 알고리즘을 구현하는 것이다. 최적화 알고리즘은 얕은 수심 분포와 연안에서의 거리를 제약조건으로 하고 최대 에너지밀도를 가진 지점을 구하는 것으로 정식화하였다. 풍황자료 산출을 위해서 국내 연안의 해상 풍황자료를 포함하는 기상풍황자료를 통계적 모델로 분석하여 바람지도를 작성하였다. 이 바람지도를 이용하여 지질 통계학 분야의 관측기법인 크리깅 모델을 구성하고, 전역최적화기법인 유전자알고리즘을 이용하여 제약조건을 만족하는 최대에너지밀도값과 그 위치를 도출하였다. 수치최적화 결과 우리나라 풍력자원의 대략적인 잠재량과 현황과악이 가능하였고, 해상풍력발전단지가 조성 가능한 개략적인 위치를 예측할 수 있었다.

### 1. 서 론

현재 국내에서 운용중인 풍력발전시스템 중에는 풍력자원에 대한 정확한 정보의 부재와 국내 풍황에 적합하지 않는 국외 모델을 이용하여 효율이 떨어지는 등의 시행착오를 보이고 있다.<sup>(1)</sup> 최적의 발전량 생산과 발전 단가 감소를 위해서 국내 풍황에 적합한 모델의 개발이 필수이며, 같은 용량의 기기라도 설치 장소의 풍황에 적합하도록 다양한 사양의 기기 개발 및 생산할 수 있어야 한다. 이러한 풍황자료는 최대에너지생산량을 발생하기 위한 풍력터빈 블레이드 설계를 위한 기초자료로서 제공된다.

전 세계적으로 많은 연구와 개발이 진행 중인 해상풍력발전의 경우, 풍력에너지밀도가 육상보다 높고 대형부지확보가 용이한 장점뿐만 아니라 소음과 진파방해 등의 거주문제가 발생하지 않아 대형풍력발전 시스템의 건설이 가능하다. 이러한 해상풍력 발전을 위해서 해상풍력자원의 파악이 중요하지만 현재까지 진행된 연구들은 정책반영을 위한 풍력자원량 산출시 요구되는 바람지도의 수평 공간해상도 1×1 km 수준에는 아직 이르지 못하고 있다.<sup>(1-3)</sup> 이러한 저해상도 지도로서는 국내 해상풍력발전단지의

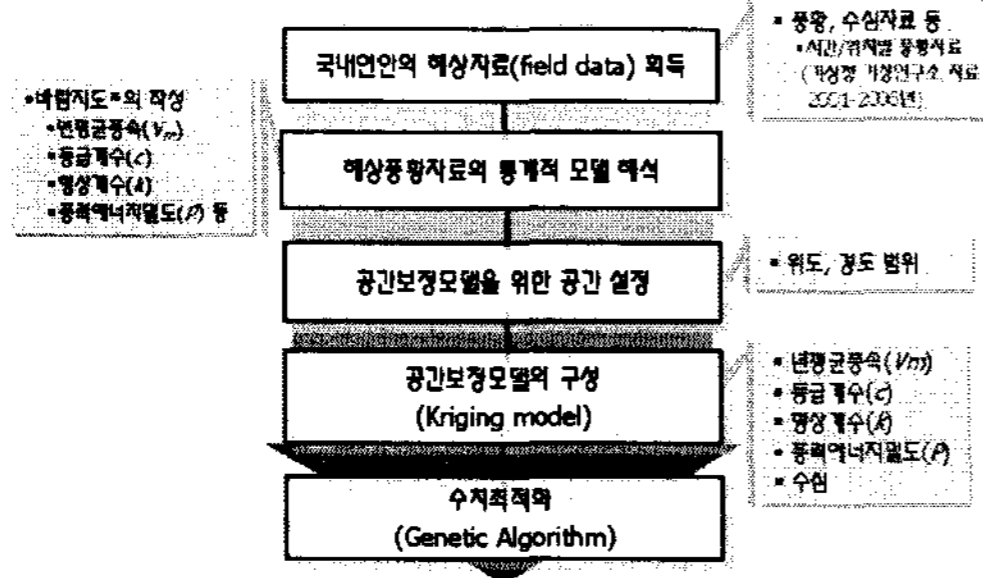
위치 선정에 있어서도 직관적인 판단이 어렵다.

본 연구의 목적은 한국형 해상풍력터빈 블레이드 설계를 위한 잠재적 최적지점의 선정과 그 최적지에서의 풍황자료를 산출하기 위한 최적화 알고리즘을 구현하는 것이다.

- 1) 서울대학교 기계항공공학부 대학원, 항공우주신기술연구소  
E-mail : ricky65@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
- 2) 서울대학교 기계항공공학부 대학원  
E-mail : ellga5@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
- 3) 서울대학교 기계항공공학부 대학원  
E-mail : yogoe9@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
- 4) 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : pkh365@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-8051 Fax : (02)887-2662
- 5) 서울대학교 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소  
E-mail : donghlee@snu.ac.kr  
Tel : (02)880-7386 Fax : (02)887-2662

## 2. 해상풍력터빈 설치지점 선정 최적화과정

그림 1에서 본 연구의 최적화과정의 개요를 나타내었다.



**Fig. 1 잠재적 풍황자료 산출을 위한 최적화과정**  
가장 최적의 풍황자원을 가지는 해상풍력단지  
의 대략적인 위치를 선정하기 위해서 다음과 같이  
문제를 정식화한다. 풍력자원의 평가척도인 에너  
지밀도,  $P(V)$ 를 최대화 하는 목적함수를 구성한다.

$$\text{Maximize } P(V) = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV \quad (1)$$

여기서  $V$ 는 순간풍속이며, 등급계수( $c$ )와 형상  
계수( $k$ )로서 특성 지어지는 와이블(Weibull) 확률분  
포,  $f(V)$ 는 다음과 같다.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{V}{c} \right)^k} \quad (2)$$

본 입지선정 최적화 연구에서 고려한 제약조건  
은 현재 대단위 풍력단지의 경우 경제성이 좋은 모  
노파일식의 기초구조물을 위하여 30 m 이하의 얇은  
수심<sup>(4)</sup>과 거주문제에 영향을 미치지 않는 해안선  
에서 5km 이상의 거리로 선정하였다.

### Constraints

$$0 \leq h \leq 30 \text{ (m)} : \text{얇은 수심분포} \quad (3)$$

$$R \geq 5 \text{ (km)} : \text{연안에서의 거리} \quad (4)$$

연안까지의 거리는, 지구 중심을 원점으로 하여  
지구를 가장 잘 나타내는 회전타원체의 3차원 직교  
좌표계(경도, 위도, 평균해수면으로부터의 높이)를  
가지는 세계측지계(World geodetic system, 1984,  
WGS-84)<sup>(5)</sup>를 이용하여 계산하였다.

이 외에도 해상풍력자원평가에서 고려해야 할  
제한사항에는 항로와 군사보호해역, 준석허가해역,  
탄약, 폭발물 및 위험물 투기해역 등이 있지만<sup>(6)</sup> 본  
연구에서는 수심과 연안에서의 거리만 고려하였다.

이러한 수치정식화를 통해서 구해야 할 매개변  
수는 다음과 같다.

- 경도(longitude,  $x_1$ ), 위도(latitude,  $x_2$ )
- 등급계수(scale parameter,  $c(x_1, x_2)$ )
- 형상계수(shape parameter,  $k(x_1, x_2)$ )
- 평균풍속(average wind speed,  $V_m(x_1, x_2)$ )

## 3. 국내 연안 해상풍황 통계적 모델

### 3.1 지역수치예측모델

본 연구에서 해상 풍황자원 분석을 위해서 이  
용한 기상청 기상연구소의 지역수치예측모델<sup>(7)</sup>의  
개요를 표 1에서 나타내었다.

Table 1 기상청 지역수치예측모델(RDAPS Sea  
wind)의 개요

Coordinate System	Spherical Coordinate
Model Domain	115°E~150°E, 20°N~50°N
Horizontal Resolution	8 km × 8 km (1/12°) (421 361)
DT	180 sec (3 hr)
Forecast time	66 H (00,12UTC)
Period	2005. 12. 7~2006. 12. 31

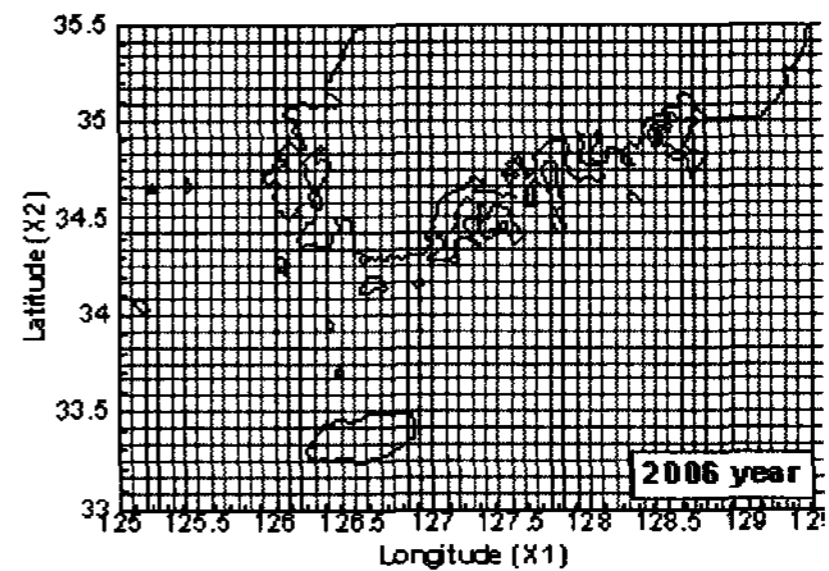
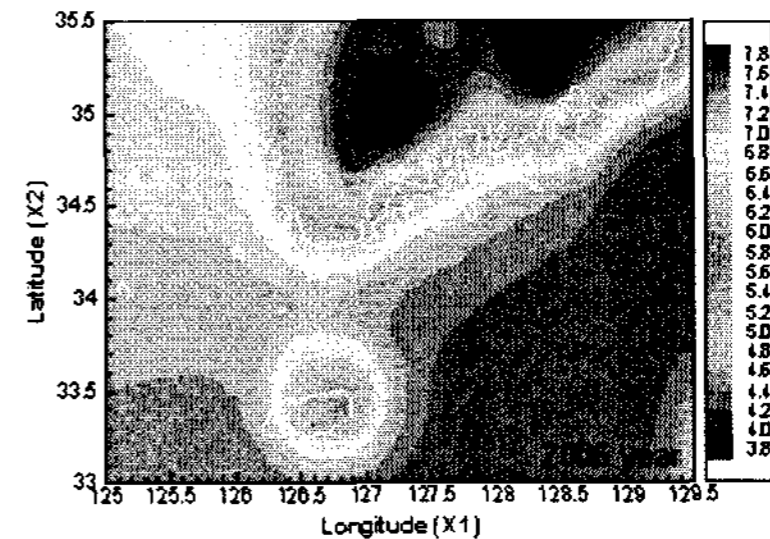
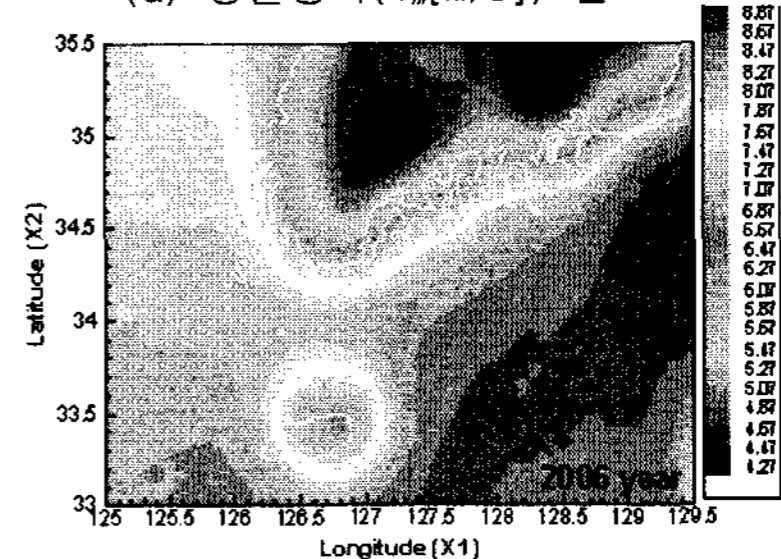


Fig. 2 우리나라 근해 측정지점 (51×31)

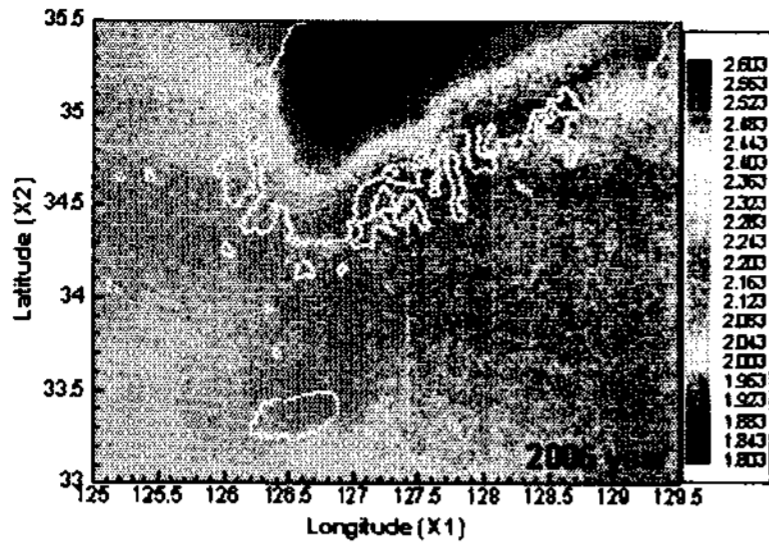


(a) 평균풍속( $V_m$ [m/s]) 분포

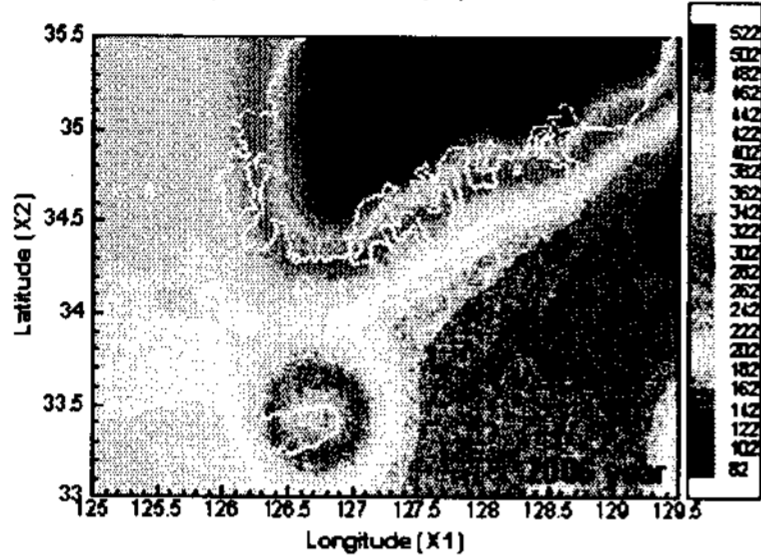


(b) 등급계수( $k$ [m/s]) 분포

넓은 공간에서 가지는 데이터 중에서 한반도  
근해의 측정지점은 그림 2에서 나타내었다. 위도  
와 경도 모두 1/12°로서 총 51×31=1581개의 격자  
로 구성하였다.



(c) 형상계수(c) 분포



(d) 에너지밀도(P[W/m2]) 분포

Fig. 3 국내 연안의 해상 바람지도

### 3.2 국내연안의 바람지도

바람지도(wind map)는 풍력발전 유망 후보지의 발굴과 사업화 결정을 위한 경제성 타당성 입증자료로서 풍력사업에 있어 매우 핵심적인 역할을 담당한다.<sup>(1)</sup> 통계적 모델을 이용하여 바탕으로 기상청의 풍황자료를 분석하였다.<sup>(8)</sup> 사용된 통계적 모델은 평균속만을 고려하는 Rayleigh 분포보다 형상계수와 등급계수를 동시에 고려하여 field data를 좀더 정확한 묘사할 수 있는 Weibull 분포 중에서 Standard deviation method를 이용하였다.

그림 3에서 통계적 모델을 이용하여 구성한 평균속도와 형상계수, 등급계수 및 에너지밀도 분포 바람지도를 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 8 × 8 km의 공간해상도로서 한반도 근해의 정확한 풍력자원량을 산출하기에는 많은 오차요인을 포함하고 있지만 국내 풍력자원의 대략적 잠재량과 현황은 충분히 파악이 가능하다.

## 4. 크리깅 모델을 이용한 공간보정모델

### 4.1 공간보정모델 구성을 위한 공간설정

한반도 해상에서 풍력발전단지를 조성하기 위한 경제성 있는 유망지역 내의 공간을 가정하였다. 800~1200 W/m<sup>2</sup>(H=60m)의 우수한 풍력에너지 밀도<sup>(2)</sup>를 가지는 세 영역을 가정하고 각 영역에서 최적화를 수행하여 최적지를 선정한다.

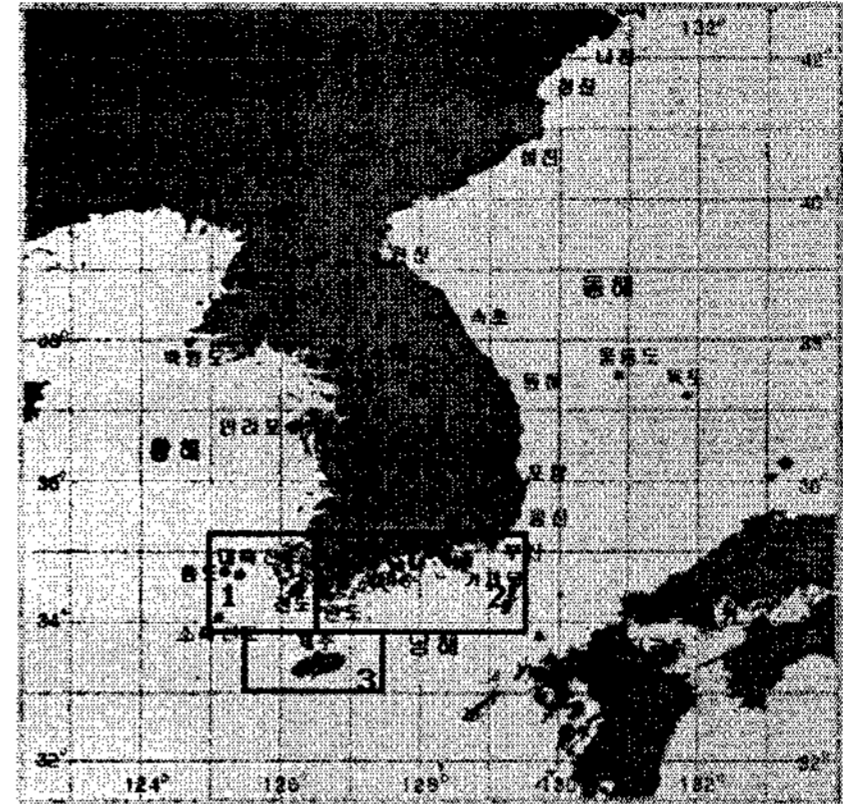


Fig. 4 크리깅 모델 구성을 위한 공간설정

Table 2 크리깅 모델 구성을 위한 공간설정 범위

영역		범위		
		최소	최대	
1	남서해안	북위	33.8°	35.3°
		경도	125.0°	126.5°
2	남해안	북위	33.8°	35.3°
		경도	126.5°	129.5°
3	제주도	북위	33.0	33.8°
		경도	125.5°	127.5°

### 4.2 크리깅 모델 구성

분석된 국내연안의 바람지도를 수치최적화에 이용하기 위해서 이용되는 크리깅 기법(Kriging methodology)은 지질통계학 분야의 관측기법으로서, Danny Krige가 광맥의 탐색에 이용하면서 널리 이용되었다. 이 기법은 임의의 공간상의 특성치를 알기 위해 이미 알고 있는 주위 값들의 가중 선형조합으로 그 값을 예측하는 기법으로서 다수의 국부 최적점이 존재하는 비선형함수에 대한 근사화가 가능하다.

크리깅 기법은 식 (1)과 같이 전역모델함수  $y$ 를 전역모델  $f(x)$ 와 국소 변동량  $Z(x)$ 의 합으로 표현하며,  $Z(x)$ 는 평균이 0 분산이  $\sigma^2$ 인 정규분포를 따른다.<sup>(9-11)</sup>

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (5)$$

설정된 공간 내 에너지밀도 분포의 풍황 통계적 모델과 크리깅 모델을 그림 5에서 비교하였다. 국부최적점이 많은 기상 통계적 모델과 비교할 때 주어진 입력값과 정확히 일치하게 크리깅 모델이 구성되었다.

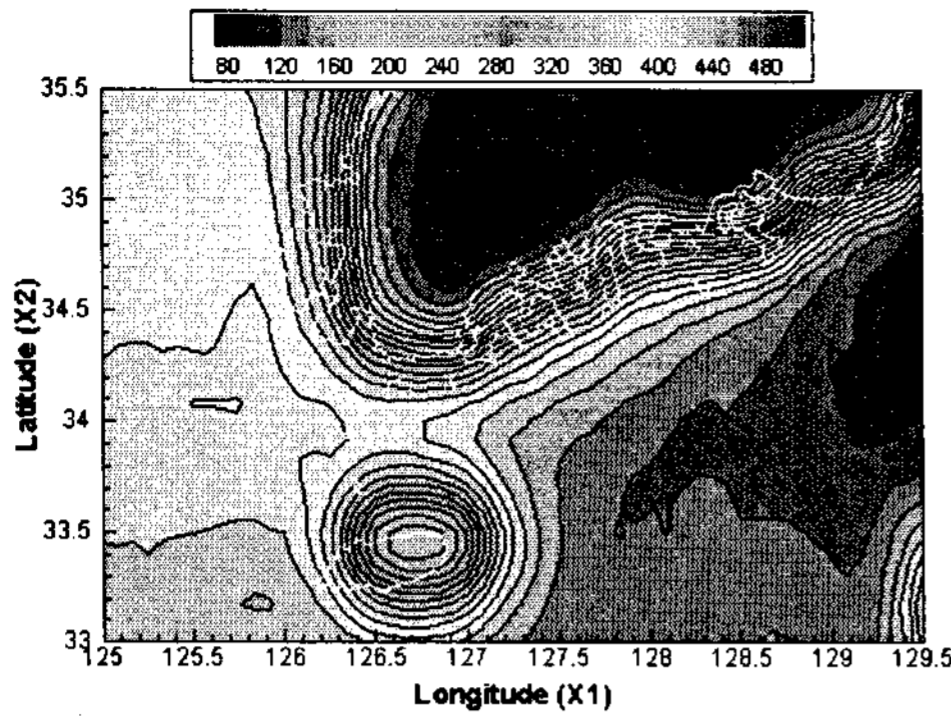


Fig. 5 설정된 공간 내 에너지밀도 분포  
(Flood : Kriging model, Black lines : Field data, 2006 year, White lines : Coast line)

### 5. 유전알고리즘을 이용한 수치최적화

생물학적인 진화론에 바탕을 두고 있는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 최적 설계 문제를 해결하는 데 활발하게 연구되고 있다. 이 방법은 구배법과 무작위 탐색의 중간 수준의 기법으로 기본적인 아이디어는 설계변수의 집합으로 이루어진 개체들이 최적해의 후보가 되어 선택, 교배, 변이, 재생산 등의 연산을 거치면서 생존값이 개선되는 방향으로 진화해 나가는 것이다. 유전자 알고리즘은 구배법 같이 기울기 정보를 이용하는 것이 아니므로 이론적으로 무한개의 개체로 무한개의 세대를 진화하면 반드시 전역적인 최적해로 수렴함이 알려져 있다. 물론, 직관적으로 파악하기 쉬운 간단한 문제에 있어서는 구배법에 비하여 비효율적이지만 불연속적인 위상을 갖거나 노이즈가 수반되는 문제에서도 강건성이 보장되는 장점이 있다. 이러한 강건성은 최적화 알고리즘 자체가 설계 변수나 하부 해석 모듈과는 분리되어 개별적으로 설계 변수의 집합만으로 수행되기 때문이며 해석 모듈의 강건성이나 maturity가 떨어지는 경우에도 잘 적용할 수 있다.<sup>(12)</sup>

유전알고리즘에 의한 수치최적화 결과를 그림 6과 표 3에서 나타내었다. 공간보정모델을 위한 공간 설정에서 남서해안과 남해안, 그리고 제주도 세 영역으로 구분하여 최적화를 수행하여 각각의 영역에서 세 개의 최적지를 도출하였다. 풍력에너지밀도는 제주도 남서해안이 비교적 높지만 수심의 제약으로 인해 남해안 쪽에서 447.74 W/m<sup>2</sup>로서 좀 더 나은 에너지밀도 분포를 보였다. 연안에서 멀어질수록 훨씬 나은 에너지밀도 분포를 갖지만 수심 분포의 제약으로 인해 에너지밀도의 최대값이 한계를 갖는다.

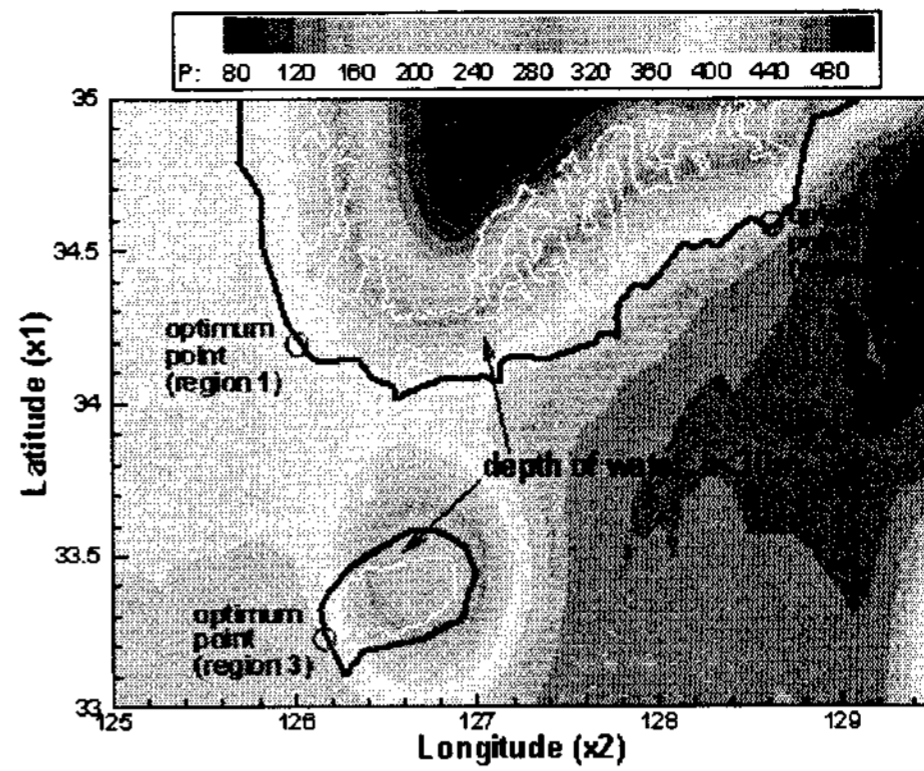


Fig. 6 GA를 통한 풍력발전단지의 개략 최적지 위치

Table 3 풍력발전단지 선정을 위한 수치최적화 결과

설계 매개변수		수치최적화 결과		
		1. 남서해안	2. 남해안	3. 제주도
설계 변수	경도 ( $x_1$ )	125.94°	128.61°	126.16°
	위도 ( $x_2$ )	34.19°	34.57°	33.24°
목적 함수	최대에너지밀도, $P$ [W/m <sup>2</sup> ]	403.06	447.74	416.55
	등급계수, $c$ [m/s]	8.06	8.44	8.33
find	형상계수, $k$	2.21	2.19	2.28
	평균풍속, $V_m$ [m/s]	7.12	7.48	7.38
제약 조건	수심, $h$ [m]	30.	30.	30.
	연안에서 거리, $R$ [km]	7.85	16.41	5.06

### 6. 결론

국내 연안의 해상풍력자원의 대략적인 잠재량과 현황을 파악하고, 풍력터빈 블레이드 설계를 위한 입력 자료로서의 풍향자료를 이용하기 위해서 풍력발전단지의 개략적인 최적지를 선정하였다.

2006년 기상청 풍향자료 해석을 통해서 바람지도의 통계적 모델을 구성하고, 개략적 해상풍력발전단지 위치 선정을 위한 최적화 알고리즘을 구성하였다. 최대에너지밀도를 목적함수로 설정하고 수심과 해안까지의 거리를 제약조건으로 가정하였다. 그리고 크리깅 기법을 이용하여 작성된 바람지도를 비선형 모델로 구성하고 유전알고리즘을 이용하여 수치최적화를 수행하였다. 수치최적화 결과, 풍력에너지밀도는 제주도 남서해안이 비교적 높지만 수심의 제약으로 인해 남해안 쪽에서 가장 좋은 에너지밀도 분포를 보였다.

본 최적화 알고리즘은 풍향, 기온, 습도 등의 다양한 기상요소에 대한 고려가 아직 부족하고, 복잡 지형에서의 국지기상현상 표현 불가능하다. 또한 국내 풍력자원의 대략적 잠재량과 현황은 파악이 가능하지만 정확한 풍력자원량을 산출하기에는 많은 오차요인 포함하고 있다. 차후 좀 더 정확한 통계적 해석모델 적용함과 동시에 항로, 군사보호해역 등 추가적인 제약조건과 해상풍력발전단지의 정확한 크기를 고려하여 최적화를 진행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 BK21 차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단과 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 깊이 감사드립니다. 특히 한반도 연안 해상의 기상풍황자료를 제공해 주신 기상청 기상연구소 해양기상지진연구실에 감사드립니다.

## References

- [1] 김현구, 최재우, 이화운, 정우식, "한반도 바람지도 구축에 관한 연구(I. 원격탐사자료에 의한 종관 바람지도 구축)", 한국신재생에너지학회지, 제1권, 제1호, 2005.
- [2] 경남호, 윤정은, 장문석, 장동순, "한반도 해역의 해상 풍력 자원 평가", 한국태양에너지학회지, 제23권, 제2호, 2003.
- [3] 김현구, 장문석, 경남호, 이화운, 최현정, 김동혁, "수치바람모의에 의한 저행상도 국가 바람지도의 구축", 한국태양에너지학회지, 제26권, 제4호, 2006.
- [4] 최병호, 김경옥, 엄현민, "한국근해의 디지털 수심 표고 데이터베이스", 한국해양항공학회지, 제14권 제1호, 2002.
- [5] World geodetic system, 1984 (WGS-84) manual, International Civil Aviation Organization, Doc 9674-AN/946, 2nd ed., 2002.
- [6] 경남호, "해상풍력발전기술", 한국태양에너지학회지, 제3권, 제3호, 2003.
- [7] Wind Waves 2006 DB, 기상청 기상연구소
- [8] Sathyajith Mathew, "Wind Energy, Fundamentals, Resource Analysis and Economics", ISBN-10 2-540-30905-5 Springer-Berlin Heidelberg, pp. 45-88, 2006.
- [9] T. W. Simpson, T. M. Meury, J. J. Korte, F. Mistree, "Comparison of Response Surface and Kriging Model for Multidisciplinary Design Optimization", AIAA 98-4755, 1998.
- [10] 최종근, "공간정보 모델링-크리깅과 최적화 기법", 구미서관, 2002.
- [11] 구요천, 전용희, 김유신, 이동호, "반응면 기법과 크리깅 기법을 이용한 설계공간 타당성 향상", 한국항공우주학회지, 제33권, 제2호, 2005.
- [12] Z. Michalewicz. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, pringer-Verlag, 1999.