

한반도 남동해안 해상풍 모의에 적합한 경계층 물리방안 연구

김 유 근 · 정 주 희 · 배 주 현 · 송 상 근 · 서 장 원*
부산대학교 대기과학과, *기상연구소 해양기상지진연구소
(2005년 4월 11일 접수; 2005년 11월 24일 채택)

Study on planetary boundary layer schemes suitable for simulation of sea surface wind in the southeastern coastal area, Korea

Yoo-Keun Kim, Ju-Hee Jeong, Joo-Hyun Bae, Sang-Keun Song and Jang-Won Seo*

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Marine Meteorology & Earthquake Research Laboratory, Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea

(Manuscript received 11 April, 2005; accepted 24 November, 2005)

The southeastern coastal area of the Korean peninsula has a complex terrain including an irregular coastline and moderately high mountains. This implies that mesoscale circulations such as mountain-valley breeze and land-sea breeze can play an important role in wind field and ocean forcing. In this study, to improve the accuracy of complex coastal wind field(surface wind and sea surface wind), we carried out the sensitivity experiments based on PBL schemes in PSU/NCAR Mesoscale Model (MM5), which is being used in the operational system at Korea Meteorological Administration. Four widely used PBL parameterization schemes in sensitivity experiments were chosen: Medium-Range Forecast (MRF), High-resolution Blackadar, Eta, and Gayno-Seaman scheme. Thereafter, case(2004. 8. 26 - 8. 27) of weak-gradient flows was simulated, and the time series and the vertical profiles of the simulated wind speed and wind direction were compared with those of hourly surface observations (AWS, BUOY) and QuikSCAT data.

In the simulated results, the strength of wind speed of all schemes was overestimated in complex coastal regions, while that of about four different schemes was underestimated in islands and over the sea. Sea surface wind using the Eta scheme showed the highest wind speed over the sea and its distribution was similar to the observational data. Horizontal distribution of the simulated wind direction was very similar to that of real observational data in case of all schemes. Simulated and observed vertical distribution of wind field was also similar under boundary layer(about 1 km), however the simulated wind speed was underestimated in upper layer.

Key Words : Complex coastal area, Surface wind, Sea surface wind, PBL schemes, MM5

1. 서 론

해양산업활동 및 해양레저활동이 활발해지면서 우리나라 연안 해역과 주변 해양의 이용과 활동이 크게 신장되어 폭풍해일이나 파랑에 대한 보다 정확한 예측의 필요성이 부각되고 있다. 이를 위해서

는 파랑모델의 입력 자료이자 복잡 다양한 해수순환에 영향을 미치는 외적요소 중의 하나인 연안과 해상에서의 정확한 바람장 산출이 선행되어야 한다¹⁾. 특히 도서 및 해안지역의 국지기상현상은 중관규모의 일기계와 불규칙하고 복잡한 지형 및 섬들로 인한 지역적 특성이 결합되어 매우 복잡하게 나타난다²⁾. 연안근처 섬들의 존재는 바다와 섬들 사이에 수평적인 불균일성을 통한 내부 경계층 및 대기 역학적인 난류를 생성시키는 역할을 하며, 생성된 난류는 중규모 순환의 강도에 영향을 미친다. 대기 경

Corresponding Author: Yoo-Keun Kim, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-510-2282
E-mail: kimyk@pusan.ac.kr

계층 내의 바람 분포에 영향을 미치는 요인으로는 하층 대기 내의 대규모 수평 기압 및 온도 경도와 하층 부분에서의 지표면 항력과 운동량 교환을 결정하는 지표면 거칠기 특성, 바람 시어를 결정하는 PBL(Planetary Boundary Layer) 깊이, 바람과 온도 연직 분포에 함께 영향을 미치는 운동량과 열의 수평 이류 등이다³⁾.

우리나라 주변해역의 해상풍과 관련된 연구로는 Lie *et al.*⁴⁾이 연안측후소 자료를 이용하여 스펙트럼 분석을 하였다. 나정열 등⁵⁾은 우리나라 주변해역 및 동중국해 북부 해역에서 10년간의 일기도와 해수면 수온자료로부터 해상풍 자료를 구축하여 주변해역에서의 해상풍에 대한 기본적인 자료 분석을 한 바 있다. Kang *et al.*⁶⁾은 3년간의 해상풍 자료로부터 응력과 응력걸을 계산하여, 그것의 공간분포를 제시 하였다. 그리고 Lie *et al.*⁷⁾과 Han *et al.*⁸⁾은 Na *et al.*⁹⁾의 해상풍 자료를 보강하여 동중국해 전역을 포함하는 우리나라 주변해역 바람장의 기본적인 특성을 분석하였다. 나정열 등¹⁰⁾은 해상풍을 정확히 이해 하기 위하여 해상풍에 직접적인 영향을 미치는 해면 기압과 간접적인 영향을 미치는 해수면온도의 결합 적교함수인 EOF(Empirical Orthogonal Function) 분석을 한 바 있다.

이처럼 해상풍에 관한 많은 연구와 위성자료 등의 관측자료 활용방안이 고찰되어 왔지만, 해상에서 부터의 연속적인 개념의 바람장 산출에는 한계가 있었고 육지내의 지형에 따른 바람장에 관한 연구는 상당히 이루어지고 있지만, 복잡 지형을 가진 해상과 연안의 경우에는 연구가 미미한 상태이다. 해상의 경우 특히 선형연구에 따르면 현 해상풍 예측 모델인 MM5 모델이 해상풍 공간 패턴을 파악할 수 있는 좋은 도구이긴 하지만, 전체적으로 약한 풍속에 대해서는 강하게, 강한 풍속에 대해서는 다소 약하게 풍속을 모사하는 한계점이 존재하여 해상풍의 특성을 정확하게 파악하는데 어려움이 있다고 알려져 있다¹¹⁾.

수치모의의 정확도 향상을 위해서는 위성 관측자료 등의 고해상도 관측자료의 활용을 통하여 초기치를 개선하는 방법과 정밀한 차분법과 최적의 물리 과정을 이용한 모형의 적용 등이 있다. 특히 해상의 경우, 지형, 식생, 도시화 등의 여러 요인에 의해 크고 작은 여러 규모의 비균질 상태를 나타내고 있는 육지와는 다른 물리식의 적용이 필요하리라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 지표 바람장에 큰 영향을 미치는 경계층 물리과정에 따른 한반도 남동해안의 바람장 분포 특성을 분석하고 MM5 모델 내 경계층 물리과정에 대한 민감도 분석을 수행하여 해상풍 모의를 위한 최적의 경계층 물리과정을

찾고자 하였으며 이를 이용해 해상풍 모의의 정확도를 향상시키고자 하였다. 이와 같이 최적화된 모델 기법을 연구하여 정확한 해상풍을 모의한다면 해양(수온, 염분, 바람, 기온 등)에보에 도움을 줄 수 있고 피해를 줄일 수 있으리라고 본다.

2. 사례 및 수치실험

한반도 남동해안은 복잡한 해안선을 중심으로 많은 도서가 연안 근처에 산재하고 있는 지리적 특성으로 인해 지형에 따른 바람변화가 클 것으로 예상되는 지역으로 본 연구의 대상영역으로 선택하였다. 사례일은 이 지역의 해상풍 특성과 지형에 의한 효과를 잘 살펴보기 위해 4 m s^{-1} 이하의 약한 풍속을 가진 맑은 날이며 강수가 없는 여름날의 대표적인 사례일(2004. 8. 25. 0000 UTC - 8. 27. 0000 UTC)을 선정하여 수치실험을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구영역으로 지형분포와 기상관측소 위치를 나타내고, 서쪽 영역에 보다 더 복잡한 해안선을 비롯하여 많은 섬들이 자리잡고 있다.

2.1. 모형

본 연구에서 사용된 중규모의 모형의 초기 및 경계자료는 KMA RDAPS(Regional Data Analysis and Prediction System)자료이고 지표 경계자료는

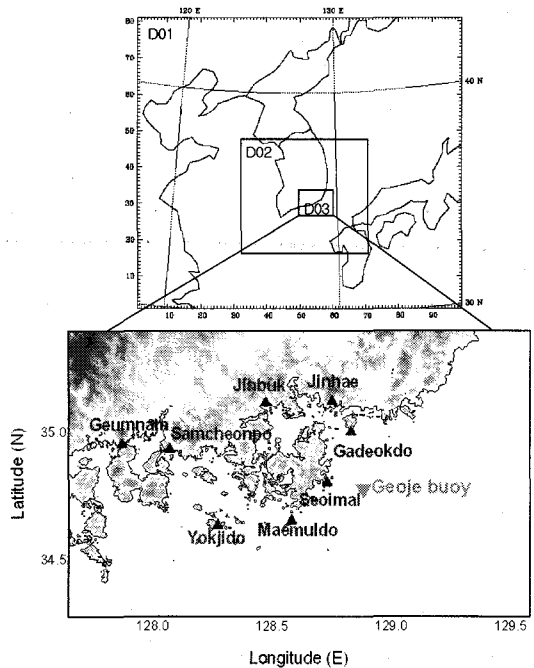


Fig. 1. Nested model domains used in this study (Triangle indicate location of AWS and inverted triangle indicate buoy monitoring meteorological sites).

USGS 30초 지형고도 자료 (USGS DEM)를 각각 이용하였으며 민감도 실험을 위해 사용한 모형은 MM5(PSU/NCAR Mesoscale Model) version 3.5이다. 모델 수행을 위한 대상영역은 Fig. 1과 같으며, 모형의 연직좌표계는 지형을 따라 가는 23층의 시그마 좌표계로 이루어져 있고, 모델의 최상단 기압은 100 hpa이다. 일반적으로 대기경계층내의 대기현상은 공간규모가 작기 때문에, 지면과 대기 경계층 사이는 조밀하게 나누어 층을 고해상도로 설정하였고 상층으로 올라 갈수록 점차 넓게 나누어 연직층을 구성하였다. 수평좌표계는 Arakawa-B 격자계이며, 모델링은 18 km에서 6 km, 2 km까지 두 번의 Nesting이 이루어졌으며 격자 중심은 위도 36.8°와 경도 127.7°이고 첫 번째 도메인은 한반도를 포함하는 81×99 격자 개수를 가지며, 분석영역인 세 번째 도메인은 64×88 격자 개수를 가지는 한반도 남동해안 지역이다. 연구에서 이용된 풍향 및 풍속은 최하층 sigma level 값인 0.998에서의 자료이다.

2.2. 수치실험설계

대기경계층은 지표로부터 자유대기로의 열, 운동량, 수분 등의 공급을 결정함으로써 수치예보와 기후예측 등에 있어서 보다 큰 규모의 대기 운동을 예측하는데 결정적인 역할을 한다¹²⁾. 이에 본 연구에서는 현 해상풍 예측 모델에서 사용하고 있는 물리적 과정에 주목하여 지상 바람장에 큰 영향을 주는 경계층 물리과정을 Case 별로 변화시켜 결과를 비교·분석하였다. 미시 물리과정은 상층의 과냉각수

와 눈이 서서히 녹는 효과 등이 가미된 Mix phase¹³⁾를 사용하였고, 적운 모수화 방법에 대해서는 비교적 최근에 개발되어 기존의 hybrid 방안들의 부족한 점들을 보완한 Kain-Fritsch II¹⁴⁾를 사용하였다. 그리고 대기 복사 과정은 명시적 구름(explicit cloud)과 장파 및 단파복사의 상호작용을 충분히 고려한 구름-복사 방안(Cloud-radiation scheme)을 이용하였고, 지면의 온도와 수분 계산을 위해서는 5층 토양 모델(5-layer soil model)을 사용하였다. 민감도 분석에 사용되어진 대기경계층 방법에 관한 자세한 설명은 Table 1에 요약하였다.

다음과 같은 모형내 물리적 과정들을 사용하여 각각의 경계층 물리방안에 대해, 연안과 해상에서의 바람장의 민감도를 분석하였으며, Table 2는 민감도 실험의 요약이다. 분석방법은 물리과정에 따라 모의된 바람장의 특성을 분석하기 위하여 해상풍의 특성을 잘 나타내는 해상지역(Open sea)과 지형에 의한 바람장의 영향이 클 것으로 예상되는 지역인 연안지역(Coastal areas), 그리고 연안지역보다는 상대적으로 지형의 영향이 적고 해상풍의 영향이 클 것으로 예상되는 지역인 도서지역(Island regions)의 세 지역으로 분류하여 바람장의 수평, 연직, 시계열 분포를 살펴보고 통계적 분석을 수행하였다.

3. 수치모의 결과 및 분석

3.1. 수평분포

모델링 수행 기간 중 낮 시간동안 국지순환이 강

Table 1. Summary of Planetary Boundary Layer

Physics Scheme		Description
Case 1 (MF)	MRF	Suitable for high resolution in PBL Efficient scheme based on Troen-Mahrt representation of countergradient term and K profile in the well mixed PBL
Case 2 (BK)	Blackdar	Suitable for high resolution PBL Four stability regimes including free convective mixed layer
Case 3 (ET)	Eta	Mellor-Yamada scheme as used in the Eta model Predicts TKE and has local vertical mixing
Case 4 (GS)	Gayno-seaman	Based on Mellor-Yamada TKE prediction Distinguished from others by the use of liquid-water potential temperature as a conserved variable

Table 2. Summary of sensitivity experiments

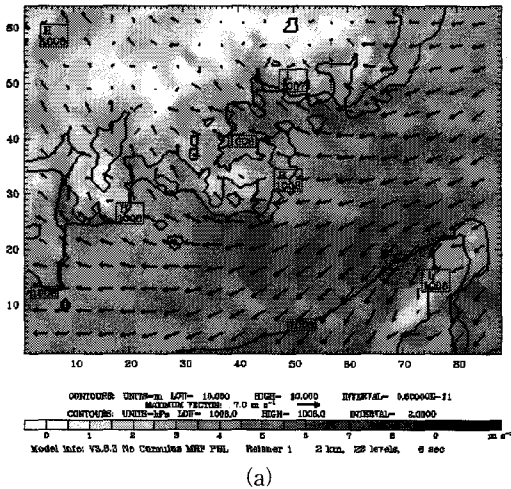
	CASE 1 (MF)	CASE 2 (BK)	CASE 3 (ET)	CASE 4 (GS)
Explicit Moisture		Mix Phase		
Cumulus		Kain-Fritsch 2		
PBL	MRF	Blackadar	Eta	Gayno-Seaman
Radiation		Cloud-radiation		
Soil		5 layer Soil model		

했던 1500 LST와 일출 전 육지와 해양의 기온차이가 가장 큰 0600 LST를 중심으로 Case별 계산영역에 대한 수평바람장을 각각 비교하였다.

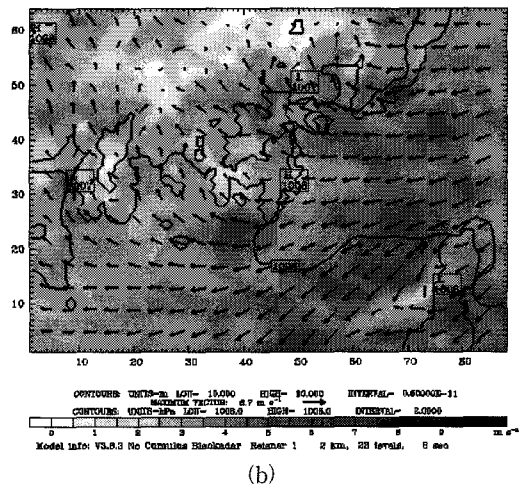
Fig. 2는 8월 26일 1500 LST의 Case별 수평분포 결과를 나타낸 것이다. 전체적인 풍향분포의 경우 주간 동안의 강한 일사에 의해 발생한 해풍이 강해져 내륙 깊이까지 침투하고 있다. 풍향분포는 낮 시간 동안 해풍의 발달과 국지 순환을 잘 모의하는 것을 보여주었으며, 네 가지 Case 모두 비슷한 수평분포를 보였고 육상에서의 풍속분포 역시 물리식에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 해양에서의 풍속의 경우에는 각 Case 별로 다소 차이를 보였다. Case 1(MF)의 경우 전체적으로 약한 풍속분포를 보이며 대마도 서쪽의 강풍대를 묘사하고 있고, Case 2(BK)도 Case 1(MF)과 비슷한 수평분포를 보이고 있는

나 해양에서의 풍속이 전체적으로 약간 높은 것이 특징이다. Case 3(ET)은 모의된 결과 중에서 해상에서의 풍속이 가장 강하게 나타났고 대마도 서쪽의 강풍대를 가장 넓게 모의하고 있는 것을 볼 수 있으며, Case 4(GS)는 전체적으로 Case 1(MF)과 Case 2(BK)와 유사한 수평분포를 나타내고 있다.

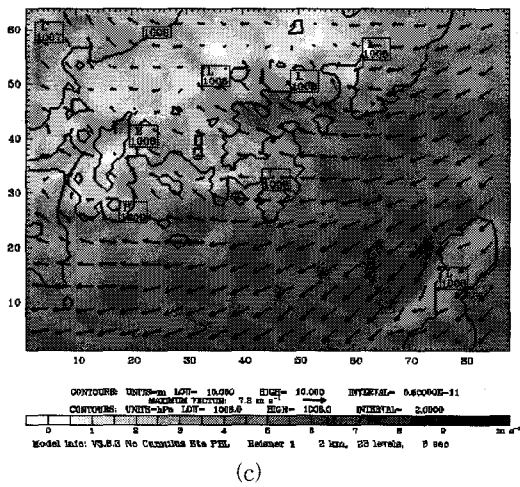
Fig. 3은 27일 0600 LST의 수평분포이다. 육풍의 영향이 강하게 남아있고, 계절풍의 영향과 합세하여 북동풍계열의 바람이 다소 많지만 육상에서는 지형에 의해 상쇄된 바람장 분포를 확인할 수 있으며, 낮 시간대보다 해상에서의 풍속은 전체적으로 더 강해졌다. 모의된 풍향과 육상에서의 풍속은 Case 별로 비슷한 분포를 보였으나 해상에서의 풍속은 Fig. 2와 마찬가지로 Case 3(ET)이 전반적으로 가장 강하게 나타났고, Case 1(MF)과 Case 2(BK)는



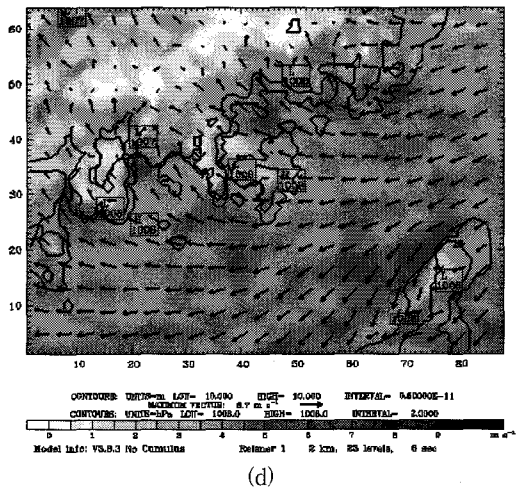
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2. Horizontal distribution of simulated wind speed and wind vector using (a)MF, (b)BK, (c)ET, and (d)GS scheme at 1500 LST on 26 August, 2004.

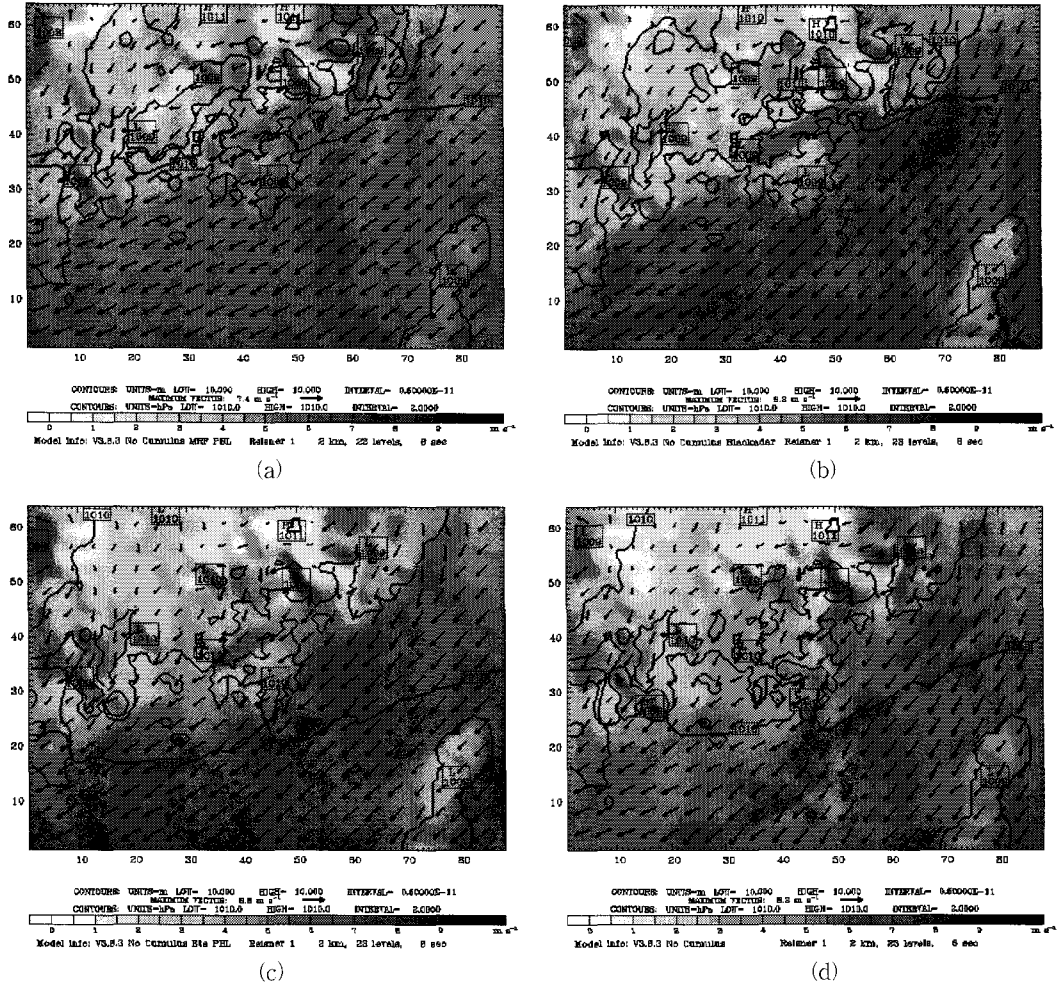


Fig. 3. Horizontal distribution of simulated wind speed and wind vector using (a)MF, (b)BK, (c)ET, and (d)GS scheme at 0600 LST on 27 August, 2004.

낮 시간대보다는 전체적으로 해상의 풍속이 강해진 것을 볼 수 있으며, Case 4(GS)는 부분적인 강풍대를 보이고 있다.

이상의 수평 바람장 분석 결과를 살펴보면 PBL 물리과정은 풍향분포보다는 풍속분포에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었으며, 그 중에서도 육상에서의 풍속보다는 해상풍의 풍속분포가 PBL 물리과정에 더 민감하게 나타났다. PBL 물리과정에 따른 풍속분포 특성을 분석하기 위해 관측지점들을 연안지역, 도서지역, 해상지역으로 나누어 Fig. 2와 Fig. 3의 모의된 풍속 값을 관측 값과 비교하였다 (Table 3). 해상의 관측 자료에는 거제 부이와 해상 풍 위성자료인 QuikSCAT 자료가 포함되었다. 8월 26일 1500 LST와 27일 0600 LST 모두 연안지역에서는 모의된 풍속 값이 관측 값을 과대 평가하는 것

으로 나타났으며, 도서지역에서는 육지도를 제외한 나머지 지역들의 모의된 풍속이 관측값을 과소 평가하는 것을 보였다. 육지도의 경우 다른 지역에 비해 약한 풍속을 나타내었는데, 이것은 지역적인 위치가 해상과 인접해 있지만 관측지점 부근에 높은 산이 위치해 있어 도서지역의 다른 관측지점들보다는 다소 지형의 영향을 많이 받고 있기 때문으로 사료된다. 반면, 해상의 모의된 풍속의 경우, 전체적으로 실제의 강한 해상풍을 잘 모의하지 못하는 것으로 나타났으나 그 중에서도 Case 3(ET)이 네 가지 Case 중 해상에서의 풍속을 가장 강하게 모의하였다.

3.2. 연직분포

관측된 연직바람장을 이용하여 Case별로 모의된 바람장과 비교하였다. 관측일시는 2004년 8월 26일 1200 LST, 1500 LST, 2100 LST와 27일 0600 LST

Table 3. The comparison of observed and simulated wind speed at 1500 LST on 26 and at 0600 LST on 27 August, 2004

Site		1500 LST on 26 August, 2004					0600 LST on 27 August, 2004				
		OB	MF	BK	ET	GS	OB	MF	BK	ET	GS
Coastal area (AWS)	Geumnam	3.1	1.37	2.50	3.54	2.92	2.5	4.71	3.76	6.61	6.00
	Samchenpo	1.1	3.95	3.74	2.49	4.62	0.3	3.01	2.24	2.73	2.70
	Jinbuk	0.6	3.37	4.23	3.57	4.07	0.8	3.94	4.10	4.38	4.63
	Jinhae	1.3	3.76	3.44	4.03	3.62	0.4	5.13	4.26	4.37	6.42
Inner sea (AWS)	Gadeokdo	7.1	4.47	5.12	5.35	4.64	4.0	5.78	6.46	6.83	6.19
	Seoimal	5.1	3.69	3.41	4.95	3.93	8.9	6.52	7.23	7.52	5.98
	Maemuldo	9.8	5.30	5.21	6.14	5.10	6.9	7.17	8.14	8.62	7.49
	Yokjido	0.5	4.65	4.25	5.72	4.45	3.4	6.27	7.05	7.34	5.58
Open sea	Geoje Buoy	8.7	4.82	4.55	5.44	4.31	11.3	6.69	7.56	7.83	7.83
	QuikSCAT 1	11.14	4.45	4.00	5.88	4.43	8.68	5.93	6.50	7.43	4.97
	QuikSCAT 2	12.73	4.59	4.52	6.06	4.58	9.47	6.11	7.05	7.66	5.65
	QuikSCAT 3	12.53	5.03	5.16	6.09	4.76	10.20	6.43	7.33	7.53	5.45

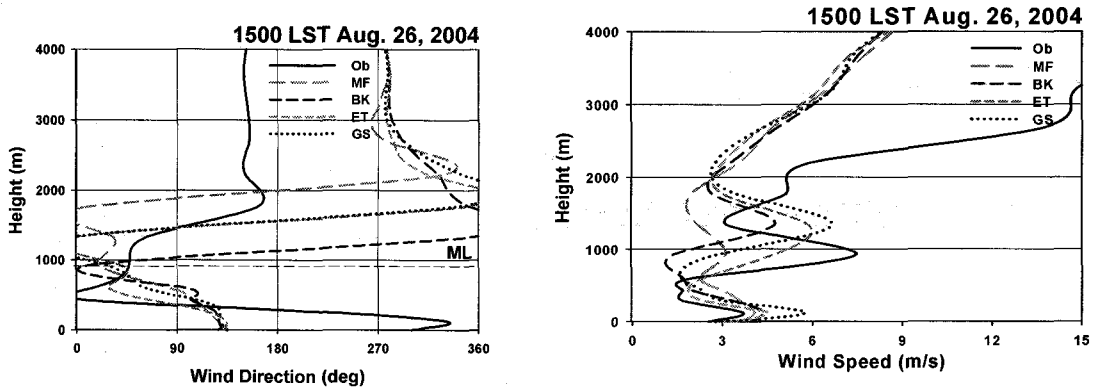


Fig. 4. Vertical profiles on height of observed and simulated wind direction and wind speed at 1500 LST on 26 August, 2004.

로 4회 관측되어졌으나 본 연구에서는 26일 1500 LST와 27일 0600 LST를 제시하였으며, 관측 장소는 연안지역인 마산 진북으로 인접 지형지물의 영향을 적게 받는 최적의 장소로 평가되어진다.

Fig. 4는 8월 26일 1500 LST의 풍향과 풍속의 연직분포를 나타내며, Fig. 5는 8월 27일 0600 LST의 풍향과 풍속의 연직분포를 4000 m 고도까지 나타낸 것이다. 26일 1500 LST에는 약 600 m 부근을 경계로 2.6 m s^{-1} 에서 7.8 m s^{-1} 까지 급격히 풍속이 증가하였고 풍향은 북서풍과 북풍, 남동풍 등으로 풍향 변화가 크게 나타났다. 모의된 풍향의 경우, 지표부근에서 네 Case 모두 남동풍을 나타내어 관측풍향과 다르게 나타났다. 다만, 약 1000 m 부근까지는 연직으로 갈수록 관측 값과 유사한 북풍과 북동풍으로 풍향이 나타났다. 그러나 2000 m 이상의 상층에서는 모의된 풍향이 관측풍향과 전혀 다르게 나타나고 있다. 풍속의 경우 지표에서부터 1000 m 부

근까지는 네 가지 Case 모두 모의된 풍속이 관측 값과 유사한 연직분포를 보이고 있으나, 그 중에서도 Case 3(ET)이 관측 풍속의 연직분포를 가장 정확하게 모의하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 상층으로 갈수록 모의된 풍속 역시 풍향과 마찬가지로 관측 값보다 과소 평가되며 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 27일 0600 LST의 경우(Fig. 5), 바람의 연직분포에서는 지표부근에서부터 155 m까지 풍속이 이전시간 보다 증가하여 고도에 따라 약 10 m/s까지의 풍속 값을 보였으며, 이전과 유사한 북풍의 풍계를 보였다. 모의된 풍향의 경우 관측 풍향과 유사하게 지표부근에서는 북풍계열의 풍향 분포를 보이며 약 1800 m 고도까지 북동풍 계열의 바람이 관측 값과 유사하게 불다가 더 상층으로 올라갈수록 풍향분포가 전혀 다르게 나타나고 있다. 모의된 풍속의 경우, 약 300 m 고도까지 Case 3(ET)과 Case 4(GS)가 관측 풍속과 가장 유사한 분포를 보

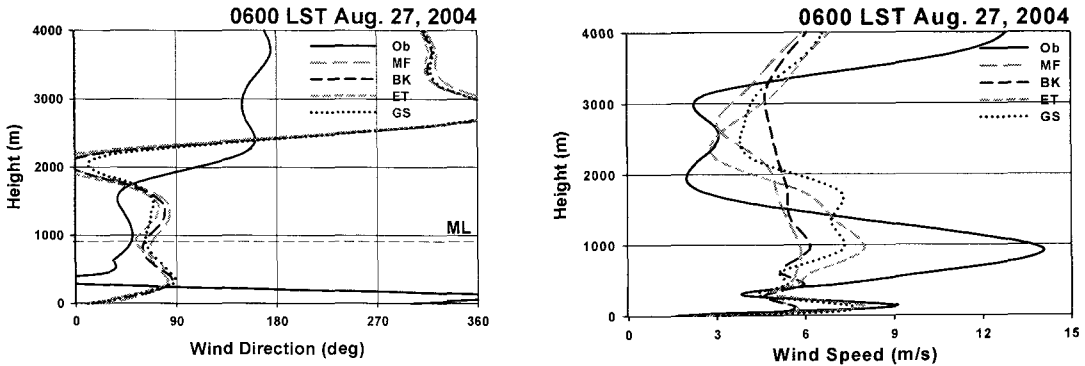


Fig. 5. Vertical profiles on height of observed and simulated wind direction and wind speed at 0600 LST on 27 August, 2004.

였으나 상층으로 올라갈수록 모의된 풍속이 관측 풍속보다 다소 평가되어지고 있다.

이상의 분석결과에서 모의된 바람장이 지표부근에서부터 약 1000 m 고도까지의 경계층내에서는 비교적 관측 값과 유사한 풍속과 풍향분포를 나타내고 있으나, 상층으로 갈수록 풍속과 풍향의 차이가 커지는 것을 볼 수 있으며 연직 풍속의 경우 Case 3(ET)이 관측 풍속과 가장 유사한 풍속 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

3.3. 시계열분포

각 관측지점의 풍속과 풍향 시계열분포를 Case별 모의 바람장과 비교하였다. 해양기상자료인 부이 자료를 분석하고, 관측지점의 지리적 위치에서 해상과 근접해 지형의 영향을 적게 받는 지역으로 분류된 가덕도, 서이말, 매물도, 옥지도와 지형의 영향을 많이 받는 지역인 금남, 삼천포, 진북, 진해를 같이 분석하여, 지형의 영향에 따른 모델의 모의 특성과 해상에서의 바람특성을 분석하고자 하였다. 모의된 풍속과 풍향의 수치 값은 관측지점이 속해 있는 각 격자 내 가장 가까운 격자점의 값을 선택하였으며, 관측지점과 가까운 격자 간의 거리 오차는 10 m 내외로 큰 차이가 없었다.

Fig. 6은 거제 부이에서의 관측 값과 각 Case별 모의된 풍향과 풍속의 시계열 분포이다. 시간에 따른 풍향분포는 크지 않았고 지속적으로 북동풍 계열의 바람이 불었으며 이것은 모의된 풍향과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 물리식에 따른 풍향의 시계열분포는 모든 Case가 유사하게 나타나, 물리식에 따른 풍향의 변화는 앞의 수평분포 분석에서와 마찬가지로 크지 않다는 것을 확인할 수 있었다. 풍속의 경우 전체적으로 강한 풍속이 시간에 따라 증가하는 경향을 보였으며 이 경향은 모델 값도 유사하게 나타나고 있으나 전반적으로 모의된 풍속들이

관측 값보다 약하게 나타났으며, 그 중에서도 Case 3(ET)이 모의된 풍속 중에서 가장 강한 풍속을 보여줌으로써, 풍속의 시계열 분석에서도 역시 관측 풍속과 가장 유사한 경향을 보여주었다.

Fig. 7은 해상과 근접해 있는 지역으로 분류된 가덕도, 서이말, 매물도, 옥지도의 풍향과 풍속의 시계열분포를 나타낸 것이다. 모의된 풍향의 경우 Case별로 약간의 풍향 차이를 보이기는 하나 대체적으로 유사한 분포를 나타내고 있으며, 서이말과 매물도는 모의된 풍향들이 지속적으로 북동풍을 나타내어 관측 풍향과 거의 일치하였으며, 가덕도와 옥지도의 경우 북풍과 북서풍으로의 풍향 전환을 민감하게 모의하고 있지는 못하지만 전체적인 풍향분포

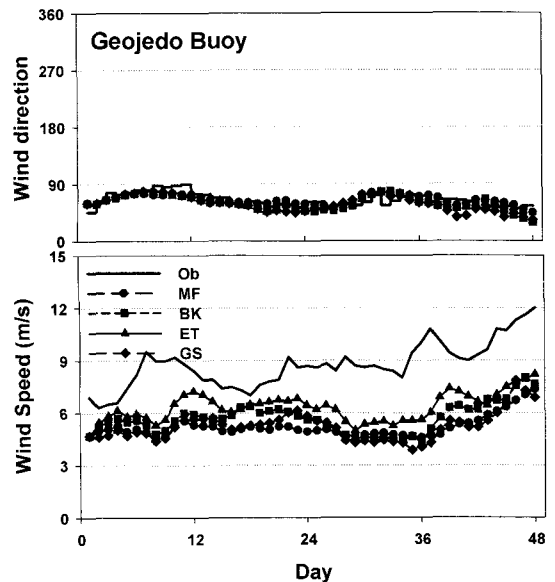


Fig. 6. Time series of observed and simulated wind direction and wind speed at Geje Buoy.

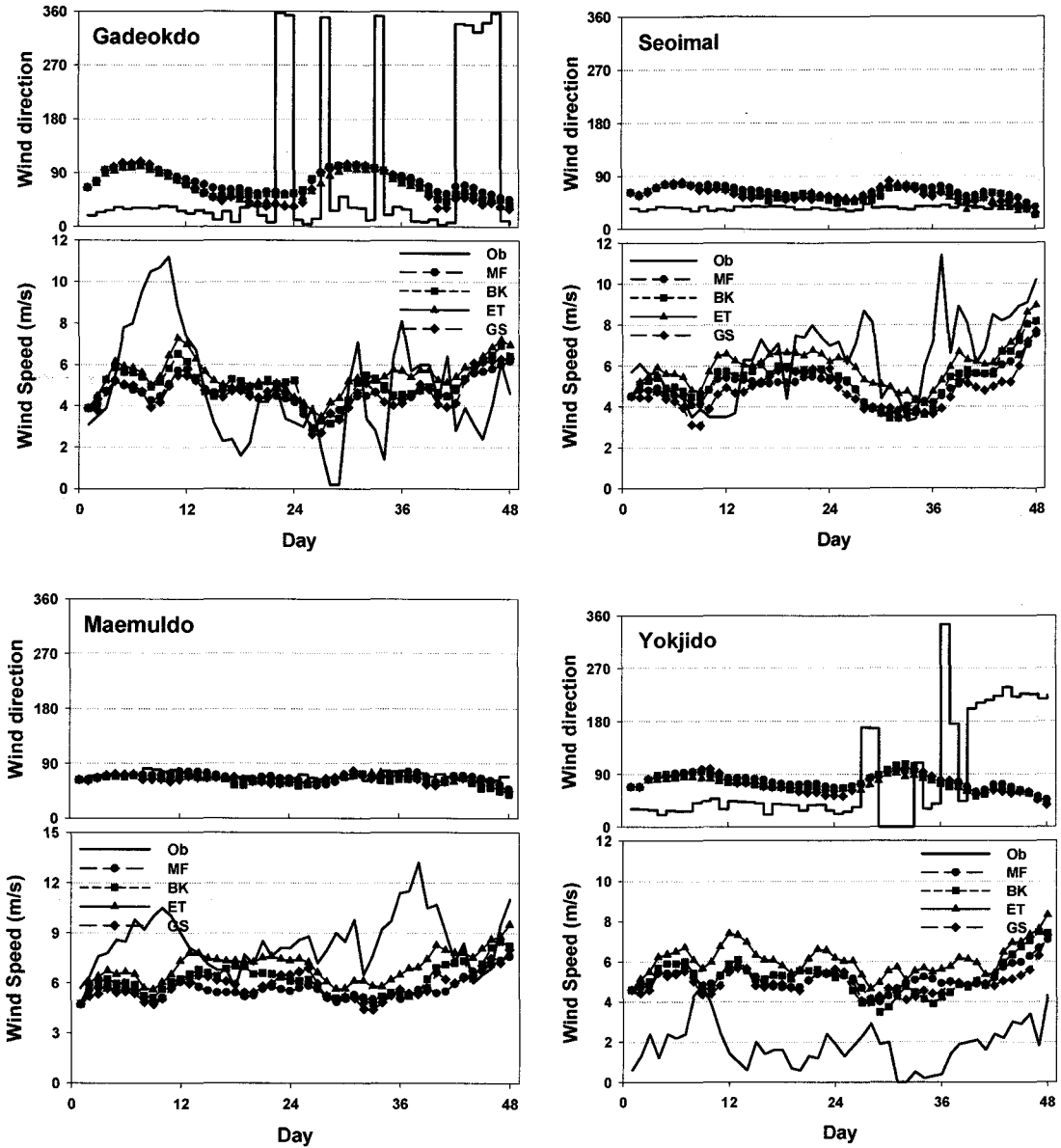


Fig. 7. Time series of observed and simulated wind direction and wind speed at Gadeokdo, Seoimal, Maemuldo, and Yokjido.

는 모의된 값이 관측 값을 비교적 잘 모사하는 것으로 나타났다. 풍속의 경우, 가덕도는 모의된 풍속이 관측 풍속의 시계열분포와 다소 차이를 보이며 강한 풍속은 약하게, 약한 풍속은 강하게 모의하고 있었다. 서이말의 경우도 관측 값과 비슷하게 풍속분포가 나타나긴 하지만 관측 값보다는 전체적으로 약한 풍속분포를 보이고 있으며, 매물도의 모의된 풍속도 관측풍속보다 약하게 나타나고 있고 최대 풍속을 제대로 모의하지는 못하였다. 옥지도의 경우 다른 지역과는 달리, 전체적으로 모의된 풍속이 관

측 풍속보다 강하게 나타났고 이런 결과를 보이는 것은 지역적인 위치가 해상과 인접해 있지만 관측 지점 부근에 높은 산이 위치해 있어 다른 관측지점들보다는 다소 지형의 영향을 많이 받고있기 때문으로 사료된다. 각 Case별 물리식에 따른 풍속분포의 차이가 다소 나타났으며 4개의 Case에서 Case 3(ET)이 가장 강한 풍속을 나타냄으로써, 관측 풍속과 유사한 시계열 분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 지형의 영향을 많이 받는 지역인 금남,

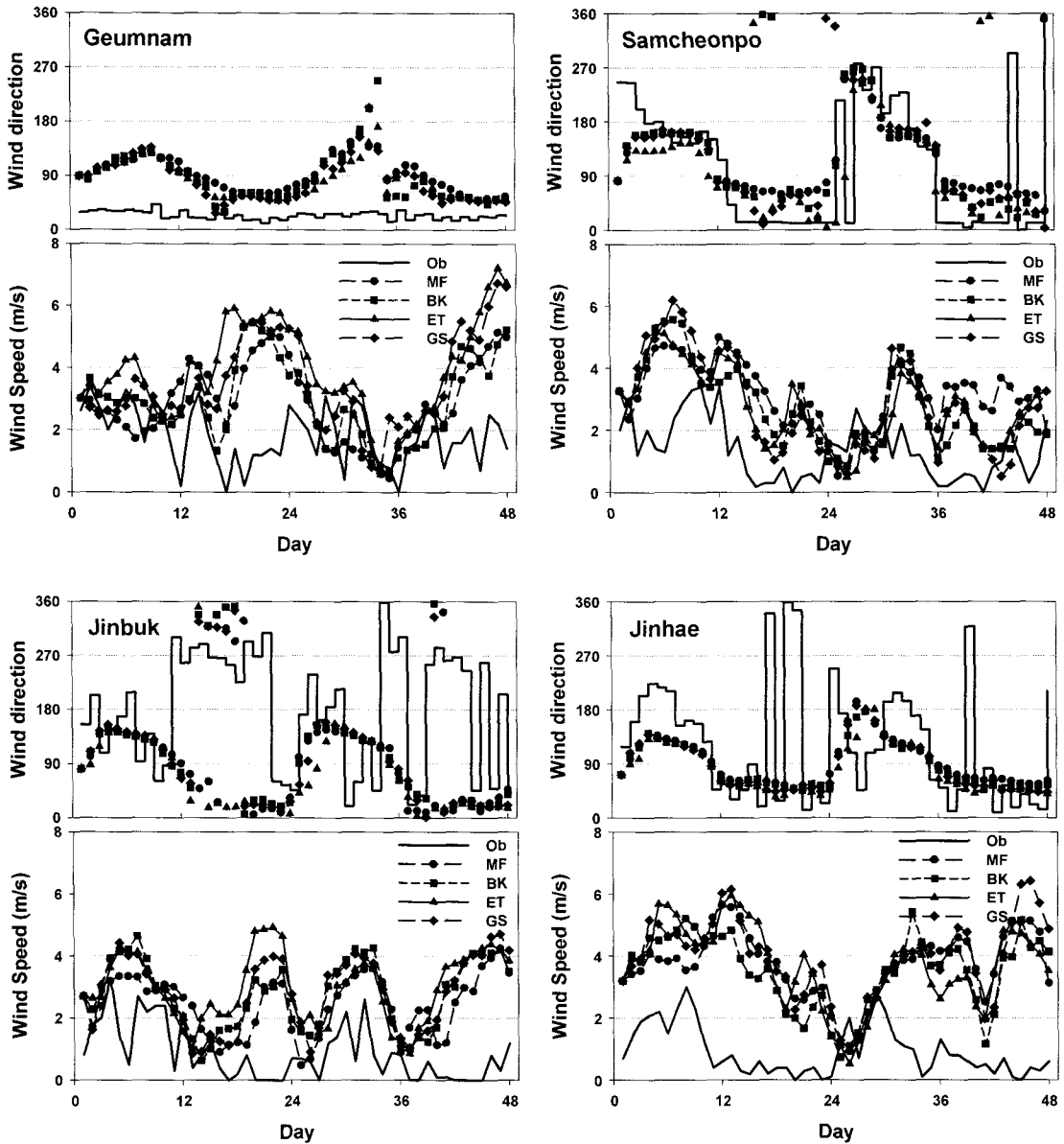


Fig. 8. Time series of observed and simulated wind direction and wind speed at Geumnam, Samcheonpo, Jinbuk, and Jinhae.

삼천포, 진북, 진해의 풍향과 풍속 시계열분포를 나타낸 것이다. Fig. 7과 같이 모의된 풍향의 경우 Case 별 분포차이는 크지 않았다. 금남지점 관측 풍향의 경우, 지속적으로 북동풍이 불었으나 모의된 풍향에서는 관측 값과는 전혀 다른 동풍-남동풍-북동풍-남동풍-북동풍의 풍향 전환을 보이고 있다. 삼천포의 경우 모의된 풍향이 관측 값과 유사하게 나타났으며, 진북과 진해도 마찬가지로 모의된 풍향이 대체적인 풍향 분포를 잘 모사하고 있지만 Fig. 7과 비교해 볼 때, 상대적으로 모델의 풍향분포 모의능

력이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 이상의 분석에서 네 Case 모두 해상에서 모의된 바람장보다 지형의 영향을 많이 받는 연안지역에서의 모의된 바람장이 관측 값과 큰 편차를 나타내었다. 이것은 PBL 물리 과정에 따른 바람장의 변화라기보다는 MM5 모델이 지형의 영향을 많이 받는 지역의 바람장을 잘 모의하지 못한다고 판단할 수 있다.

또한 관측 풍속의 경우, 주변의 복잡한 지형의 영향을 받는 지리적 특성으로 전 관측지점들이 4 m s^{-1} 이내의 약한 풍속을 보였으며 모의된 풍속의 경우,

모든 관측지점들에서 관측 값보다 아주 강하게 나타났다. 금남의 경우 전체적으로 모의된 풍속이 관측 값보다 훨씬 높았으며 특히 강한 풍속의 경우 모의된 값이 관측 값과 4 m s⁻¹ 이상의 차이를 보였다. 삼천포와 진북의 경우 모의된 풍속이 관측 값과 유사한 분포를 나타내지만 풍속의 강도는 다소 차이를 보였고 진해의 경우도 모델 값이 관측 값보다 아주 강하게 나타났고 전체적인 패턴도 다소 차이를 보였다.

분석결과, 지형의 영향을 많이 받는 관측지점들의 경우 전체적인 패턴은 어느 정도 비슷하였으나 풍속강도에서 큰 차이를 보였으며, 모델 값이 관측 값보다 훨씬 강한 풍속을 나타내었다. 이것은 모델이 복잡한 지형에 의한 풍속의 감소효과를 잘 묘사하지 못하고 있으며, 민감하게 반응하는 정도는 풍향보다는 풍속에서 더 큰 것으로 사료된다.

3.4. 통계적 분석

지역에 따른 바람장의 수평과 연직분포와 시계열 분석에서 살펴본바, 풍향보다는 풍속이 물리과정에 더 민감하게 나타났다. 따라서 풍속에 관한 통계분석을 통해 각각의 지역적 특성에 따른 물리과정의 특징을 살펴보았다.

각 지점별 풍속의 성분을 상호 비교하기 위해, RMSE(Root mean square error)와 BIAS를 계산하였다. BIAS는 관측자료가 평균값으로부터 벗어난 형태를 보이며, RMSE는 통계학에서 표준 편차의 의미, 즉 예상한 값과 실제 관측 결과가 평균적으로 얼마만큼 차이가 있는지를 나타낸다. 이 방법들은 주로 모델결과와 관측자료 검증에 사용되며 식은 다음과 같다¹⁹⁾.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_{mod} - Y_{obs}) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_{mod} - Y_{obs})^2} \quad (2)$$

상기식에서 N은 검증 자료의 개수이며, Y_{mod}, Y_{obs}는 모델값과 관측값을 나타낸다. Table 4는 풍속에 대한 RMSE와 BIAS의 통계적 검증이다. 연안 지역에서 해상으로 갈수록 대체적으로 RMSE 값이 증가하여 큰 편차와 편향을 보이고 있다. 현 해상풍 예측모델과 동일한 물리과정을 이용한 Case 1(MF)이 연안지역에서는 바람장을 적절하게 모의하였지만 도서지역과 해상지역에서는 그 정확도가 낮아지는 것으로 나타났다. 하지만 Case 3(ET)에 의해서 산출된 바람장의 경우, 해상으로 갈수록 다른 Case에 비해 난류운동에너지와 연직혼합을 예측하는 능력이 우수하여 해상에서의 강한 풍속을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

해상풍 예측을 높일 수 있는 방안 중의 하나로써 현업 해상풍 예측 모델로 사용 중인 MM5 모형 내의 물리과정중 경계층 물리과정에 따른 바람장의 민감도 분석을 수행하여, 그 결과를 수평, 연직, 시계열 분포와 통계적 분석을 중심으로 살펴보았다.

수평분포 분석 결과, Case 별 풍향분포와 내륙에서의 풍속분포는 물리과정의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나 해상에서의 풍속분포는 물리과정에 따라 다소 큰 차이를 보였다. 모의된 Case들이 전체적으로 관측 값보다 약한 풍속을 보였으나 그 중에서도 Case 3(ET)이 해상에서의 강풍을 잘 모의하였으며 풍속분포 역시 유사하게 나타났다.

연직분포 분석 결과, 모델의 바람장이 지상에서 1000 m 부근의 경계층까지는 비교적 관측 값과 유

Table 4. Statistics of RMSE and BIAS for wind speed

	Site	RMSE				BIAS			
		MF	BK	ET	GS	MF	BK	ET	GS
Coastal area (AWS)	Geurnnam	1.898	1.937	2.734	2.456	1.066	1.120	2.069	1.675
	Samcheonpo	2.221	1.913	1.836	2.009	1.812	1.405	1.383	1.454
	Jinbuk	1.929	2.261	2.546	2.363	1.570	1.906	2.115	1.957
	Jinhae	3.153	2.872	3.141	3.402	2.785	2.573	2.754	3.022
Inner sea (AWS)	Gadeokdo	2.557	2.450	2.402	2.598	-0.152	0.204	0.582	-0.203
	Seoimal	2.156	2.020	1.724	2.302	-1.346	-1.100	-0.409	-1.607
	Maemuldo	3.346	3.019	2.388	3.251	-2.845	-2.300	-1.500	-2.685
	Yokjido	3.509	3.560	4.394	3.319	3.337	3.365	4.249	3.130
Open sea	Geoje Buoy	3.723	3.290	2.667	3.712	-3.566	-3.060	-2.425	-3.520
	QuikSCAT 1	4.525	4.575	3.237	4.780	-4.151	-3.994	-2.666	-4.516
	QuikSCAT 2	5.376	5.131	4.092	5.487	-4.844	-4.338	-3.353	-5.006
	QuikSCAT 3	5.148	4.671	4.124	5.518	-4.758	-4.241	-3.554	-5.147

사한 풍속과 풍향분포를 나타내고 있으나 상층으로 갈수록 큰 차이가 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 경계층내에서 연직 풍속분포는 Case 3(ET)이 비교적 유사하게 나타났다.

시계열분석 결과, 각 Case에 따른 풍속분포의 차이가 다소 나타났으며 4개의 Case 중 Case 3(ET)이 가장 강한 풍속을 나타내었으며 이것은 관측 값에 가장 가까웠고, 시계열 패턴 역시 관측 값과 유사하게 나타났다. 지형의 영향을 많이 받는 연안지역에서는 모델 값이 관측 값보다 훨씬 강한 풍속을 나타내었으나, 지형의 영향보다는 상대적으로 해상풍의 영향이 강한 지역인 도서지역과 해상지역에서는 모의된 값이 관측 값보다 약한 풍속을 나타내었다. 이것은 모델이 복잡한 지형에 의한 풍속의 감소 효과를 잘 모의하지 못하는 것으로 생각할 수 있으며, 민감하게 반응하는 정도는 풍향보다는 풍속에서 더 큰 것으로 나타났다.

통계분석결과, Case 3(ET)에 의해 산출된 바람장이 해상으로 갈수록 다른 Case에 비해 난류운동에너지와 연직혼합을 예측하는 능력이 다소 우수한 물리식의 특성으로 인하여 다른 물리식들보다 해상에서의 바람을 관측값과 유사하게 모의하는 경향을 찾아볼 수 있었다. 그러나 전반적으로 RMSE의 값이 크고 큰 편차와 편향을 보이고 있었다.

현재 가장 널리 사용되는 MRF 물리식에 사용되는 어지는 K-profile 모형은 다양한 크기의 에디의 효과를 동시에 고려해줄 수 있다는 장점과 예단 방정식을 풀 필요가 없어 계산 시간이 절약된다는 등의 장점에도 불구하고 에디 점성 계수의 연직 분포 자체가 아직 경험적인 방법에 많이 의존하는 문제점을 갖고 있으나 Eta 물리식의 경우, TKE와 그 국지 연직 혼합을 잘 예측하여 해상풍을 가장 유사하게 모의하였다. 그러나 모든 물리적 방안의 적용에 한계가 있음을 나타내었고 이것은 추후 고해상도 기상자료 동화 및 지형자료를 통한 모형의 초기 및 경계자료의 향상이 이루어진다면 보다 진전된 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상지진연구개발사업 “해양기상변화 탐지기술개발” 과제의 일환으로 수행된 것입니다.

참고 문헌

1) 김동호, 박원우, 김현중, 이동인, 한영호, 서태건, 2001, 산업기상 : 실측에 의한 기상청 상풍 모형 검증, 한국기상학회보, 11(3), 74-77.

2) 이화운, 김유근, 정우식, 2000, 복잡한 연안지역에서 해풍시작시 지형의 영향에 대한 수치모의. 한국기상학회지, 36, 561-572.

3) 윤일희, 2000, 미기상학개론, 시그마프레스, 71pp

4) Lie, H. J., I. K. Bang, S. S. Yook and C. W. Lee, 1983, Analysis of meteorological data at coastal weather station around Korea, KORDI. BSPE 00053-74-1, 108pp.

5) 나정열, 서장원, 한상규, 1992, 한국근해의 월평균 해상풍, 한국해양학회지, 27(1), 1-10.

6) Kang, I. S., M. K. Kim and T. Shim, 1994, Seasonal variation of surface heat budget and wind stress over the seas around the Korean Peninsula, J. Oceanol. Soc. Korea, 29(4), 325-337.

7) Lie, H. J., J. Y. Na, S. K. Han and J. W. Seo, 1994, Monthly mean sea surface winds over the East China Sea, KORDI Rep. BSPE 00367-683-1, 91pp.

8) Han, S. K., H. J. Lie and J. Y. Na, 1995, Temporal and spatial characteristics of surface wind over the adjacent seas of the Korean Peninsula, J. Oceanol. Soc. Korea, 30(6), 550-564.

9) Na, J. Y., J. W. Seo and S. K. Han, 1992, Monthly-mean sea surface winds over the adjacent seas of the Korea Peninsula, J. Oceanogr. Soc. Korea, 27(1), 1-10.

10) 나정열, 한상규, 서장원, 노의근, 강인식, 1997, 한국 동해에서의 해면기압, 해수면온도와 해상풍의 경험적 직교함수 분석, 한국수산학회지, 30(2), 188-202.

11) 서장원, 장유순, 2002, 중규모 기상모델(MM5/KMA)과 3세대 파랑모델(WAVEWATCH - III)로 계산된 한반도 주변 해역의 2002년 월평균 해상풍과 파랑분포 특성, 한국해양학회지, 8(3), 262-273.

12) 김형진, 노의근, 1999, 새로운 큰에디모사 모형에 의한 대류경계층의 모사 및 아격자 모수화의 영향 분석, 한국기상학회지, 35(4), 587-598.

13) Reisner, J., R. J. Rasmussen and R. T. Bruintjes, 1998, Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124B, 1071-1107.

14) Kain, H. S. and J. M. Fritsch, 1993, Convective parameterization for mesoscale models;

- The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, K. A. Emanuel and D. J. Raymond, Eds., Amer. Meteor. Soc., 246.
- 15) Hong, S. Y. and H. L. Pan, 1996, Comparison of NCEP-NCAR Reanalysis with 1987 FIFE Data, Mon. Wea. Rea., 124, 1480-1498.
 - 16) Blackadar, A. K., 1979, High resolution models of the planetary boundary layer, Advances in Environmental Science and Engineering, J. Pfafflin and E. Ziegler, Eds., Gordon and Breach, 50-85.
 - 17) Janjic, Z., 1994, The step mountain eta coordinate model : Further development of the convection, viscous sublayer and turbulent closure scheme, Mon. Wea. Rev, 122, 927-945.
 - 18) Shafran, P. C., N. L. Seaman and G. A. Gayno, 2000, Evaluation of numerical predictions of boundary layer structure during the Lake Michigan ozone study, J. Appl. Meteor., 39, 412-426.
 - 19) 김태희, 오희진, 윤용훈, 2004, 경기만 주변 해역의 국지 파랑 관측 자료 비교, 485pp.