

WRF 모형을 통한 복잡 연안지역에서의 해상풍 모의 개선

Improvement in the Simulation of Sea Surface Wind over the Complex Coastal Area Using WRF Model

김유근 · 정주희* · 배주현 · 오인보 · 권지혜 · 서장원¹⁾
부산대학교 대기과학과, ¹⁾기상연구소 해양기상지진연구소
(2005년 12월 6일 접수, 2006년 3월 22일 채택)

Yoo-Keun Kim, Ju-Hee Jeong*, Joo-Hyun Bae, In-Bo Oh,
Ji-Hye Kweon and Jang-Won Seo¹⁾
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea
¹⁾*Marine Meteorology & Earthquake Research Laboratory,*
Meteorological Research Institute, Seoul, Korea
(Received 6 December 2005, accepted 22 March 2006)

Abstract

We focus on the improvement in the simulation of sea surface wind over complex coastal area located in the southeastern Korea. In this study, it was carried out sensitivity experiment based on PBL schemes and dynamic frame of MM5 and WRF. Two widely used PBL parameterization schemes were chosen : Medium-Range Forecast (MRF) and Mellor-Yamada-Janjic (MYJ). Thereafter, two cases of sea fog days with weak wind speed and typhoon days with strong wind speed were simulated and analyzed.

The result of experiments indicated that wind field of WRF model was shown more similar distribution with observational data, compared with that of MM5. Simulation of sea surface wind during sea fog days with weak wind speed and typhoon days with strong wind speed were shown similar horizontal distribution with observational data using MYJ and MRF PBL schemes of WRF model, respectively. Horizontal distribution of sea surface wind was more sensitive according to dynamic frame and PBL schemes of model during sea fog days and typhoon days, respectively.

Key words : Complex coastal area, Sea surface wind, Improvement, PBL schemes, MM5, WRF

1. 서 론

기압계가 해상을 통과하면 바람에 의하여 파랑을

발생시키게 된다. 이러한 파랑은 해상을 향해 중인 선박이나 항만을 파괴시켜 해난재해의 가장 중요한 원인이 된다. 그러므로 파랑을 정확하게 산출하기 위해서는 우선 해상의 바람이 정확히 산출되어야 한다 (Marsdon, 1987; Hsueh and Romea, 1983). 해상풍은 대기과 해양사이의 열교환에 중요한 역할을 하여 해

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-583-2652, E-mail : jeongjuhee@pusan.ac.kr

상을 통과하는 저기압을 발달시키는 원인이 되며(안중배와 정창희, 1984; Anthes *et al.*, 1983; 민경덕, 1974), 해상의 부유물, 특히 기름과 같은 오염물의 해수순환에 의한 이동을 예측하는 데에도 중요한 변수가 된다(김규명, 1989).

해상풍은 대기의 안정도, 경압성, 지표면 특성 등 복잡한 대기 경계층 역학의 지배를 받고 있으며, 특히 경압성에 의한 효과는 대기의 안정도와 함께 매우 중요한 영향을 준다는 것이 이미 많은 연구에서 알려져 있다(Danard, 1988; Hoxit, 1974). 해상풍 산출방법은 대기경계층 역학에 기초한 해상풍 산출모형을 수립할 수 있으며, 종관 관측된 기상 자료(기온, 기압, 해수면온도)로부터 경계층 역학에 기초하여 해상풍을 비교적 간단히 구할 수도 있다(김규명과 강인식, 1992).

지금까지 수치모형의 모의 능력 비교, 평가는 주로 WRF (Weather Research and Forecasting model)와 MM5 (Fifth-generation Mesoscale Model) 같은 중규모 모형을 이용하여 한반도 여름 집중 호우를 중심으로 연구가 이루어져 왔다(함수련 등, 2005). Choi *et al.* (2001)은 동아시아 지역에서 장마 기간에 대한 WRF와 MM5의 성능을 평가하였으며, 노유정과 홍성유(2002)는 한반도 집중호우 사례에 대하여 MM5의 과소 예측과 WRF의 과대 예측 경향을 밝혔고, 박세영 등(2002)은 2002년 8월 한 달 동안의 결과를 비교하여 WRF가 과대 예측하는 경향은 있지만, MM5에 비하여 다소 좋은 결과를 나타냄을 보였다. 또한 겨울 사례에 대해서는 변건영(2005)에 의해 다루어졌으며, 한반도 겨울 강수에 대한 과대 모사는 WRF 모형에서도 나타나고 있음을 보였다. 이와 같은 두 모형에 대한 비교가 국내에서 있었으나 주로 강수 예측에 한정되어 있으며, 바람장의 경우에는 그 연구가 이루어진 바가 극히 적었다.

이처럼 해상풍에 관한 많은 연구와 위성자료 등의 관측자료 활용방안이 고찰되어 왔지만, 해상에서부터의 연속적인 개념의 바람장 산출에는 한계가 있었고 육지내의 지형에 따른 바람장에 관한 연구는 상당히 이루어지고 있지만, 복잡 지형을 가진 해상과 연안의 경우에 해상풍에 관한 연구가 미미한 상태이다. 특히 선행연구에 따르면 현 해상풍 예측 모델인 MM5 모델이 해상풍의 공간 패턴을 파악할 수 있는 좋은 도구이지만, 전체적으로 약한 풍속에 대해서는 강

하게, 강한 풍속에 대해서는 다소 약하게 풍속을 모사하는 한계점이 존재하여 해상풍의 특성을 정확하게 파악하는데 어려움이 있다고 알려져 있다(서장원과 장유순, 2002). 이에 차세대 모형인 WRF와 MM5의 frame 차이에 따른 바람장 모의 결과와 대기안정도, 경압성, 지표면 특성 등 복잡한 대기 경계층 역학의 지배를 받고 있는 해상풍의 PBL scheme에 따른 바람장 모의 결과를 비교해 볼 필요성이 있다고 판단되었다. 본 연구를 통해 복잡한 연안과 해상에서의 바람장이 정확히 예측된다면 연안에서의 대기오염 확산 추정 및 풍력 포텐셜 활용에 기여하는 바가 클 것이며, 정확한 해상풍 예측은 난수괴 등의 해류 흐름 또한 정확히 예측할 수 있고, 이를 통해 어장 등의 해양산업 활용에 기여할 것이다. 또한 파랑모델의 예측을 상승에 기여함으로써 풍랑 등에 의한 인근 주민의 피해를 줄일 수 있으리라 본다.

2. 모델 개요

우수한 해상풍 예측 모형의 비교 연구를 위해 MM5와 WRF 모델을 선택하여 모델링을 수행하였다. 본 수치실험에 사용된 MM5 모델은 2004년 11월에 발표된 버전 3.7이고, WRF 모델은 2005년 8월에 발표된 버전 2.1로 두 모형은 dynamic frame이 non compressible, fully compressible 이라는 것과 격자체계가 Arakawa B grid, Arakawa C grid 라는 대표적인 차이점을 가지고 있다(표 1). 두 모형간의 수치 실험을 통해 동일한 초기자료, 동일한 해상도, 동일한 물리과정을 구성하여, 순수한 수치계와 격자계의 차이로 나타나는 해상풍 모의 능력을 비교해 보고자 하였다. 동시에 대기안정도, 경압성, 지표면 특성 등 복잡한 대기 경계층 역학의 지배를 받는 해상풍 모의에 가장 영향을 주리라 판단되는 난류 행성 경계층(PBL: Planetary Boundary Layer) 모수화 방안에 따른 실험도 같이 수행함으로써, 해상풍을 가장 잘 모의할 수 있는 경계층 모수화 방안을 함께 찾아보고자 하였다.

초기 및 경계 자료는 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ NCEP-NCAR 재분석 자료를 사용하였으며 지면 자료로는 T62 Gaussian (192×94) Grid NCEP-NCAR 재분석 자료를 사용하였다. 모델 수행을 위한 대상영역은 그림 1과 같으며 모형의 연직좌표계는 100 hpa을 상단으로

Table 1. Comparison of MM5 and WRF.

MM5	WRF
Terrain-following height (sigma-z) vertical coordinate	Terrain-following hydrostatic pressure vertical coordinate
Arakawa B-grid	Arakawa C-grid
1 st order (time-filtered) Leapfrog time integration	3 rd order Runge-Kutta split-explicit time integration
Advective formulation (no conservation properties)	Conserves mass, momentum, entropy, and scalars using flux form prognostic equations
2 nd order centered differencing for advection	5 th order upwind or 6 th order centered differencing for advection

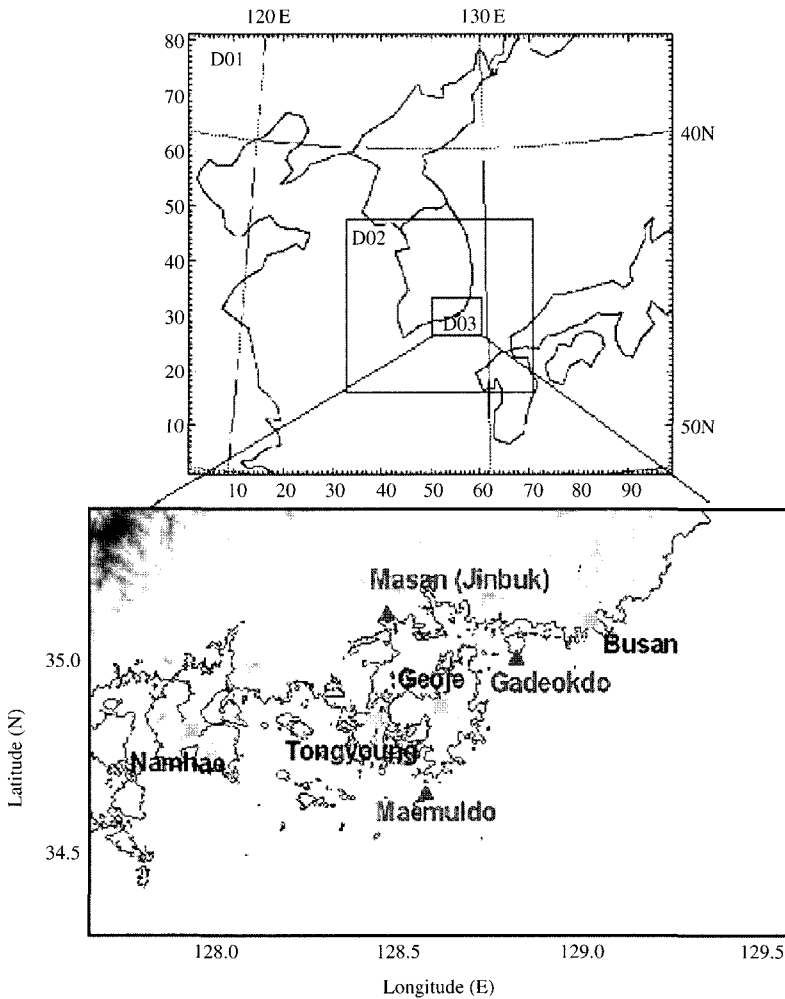


Fig. 1. Nested model domains used in this study (Triangle indicate location of AWS).

하는 지형을 따라 가는 23층의 시그마 좌표계이고, 일반적으로 대기경계층내의 대기현상은 공간규모가 작기 때문에 지표에 가까운 층을 고해상도로 설정하

였다. 모델링은 18 km에서 6 km, 2 km까지 두 번의 Nesting이 이루어졌으며 격자 중심은 위도 36.8°와 경도 127.7°이다. 첫 번째 도메인은 81 × 99 격자 개

수를 가지고, 두 번째 도메인은 91×112 격자 개수를 가지며, 분석영역은 세 번째 도메인으로 64×88 격자 개수를 가진다. 연구에 이용된 풍향 및 풍속은 sigma level 0.998에서의 자료이다.

모형의 물리과정은 가능한 한 유사하게 적용하였다. 적은 모수화 방법으로 Kain-Fritsch 적은 모수화 방안(Kain and Fritsch, 1993)을 사용하고, 복사 모수화 방안으로는 MM5 모형에서는 RRTM 복사 모수화 방안(Mlawer *et al.*, 1997), WRF 모형에서는 장파복사에 대해서는 RRTM 방안, 단파복사에 대해서는 simple MM5 방안(Dudhia, 1989)을 사용하였다. 지면 모수화 과정은 5-layer thermal diffusion모형(Chen and Dudhia, 2001)을 기본적으로 사용하였다. 경계층 모수화 방안은 현 기상청에서 사용하고 있는 Medium-Range Forecast (MRF) PBL과 Turbulent Kinetic Energy (TKE)를 예측하고 연직 혼합을 고려하는 Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) PBL을 선택하여 MM5 와 WRF에 적용하여 실험을 하였다. 대기경계층은 지표로부터 자유대기로의 열, 운동량, 수분 등의 공급을 결정함으로써 수치 예보와 기후예측 등에 있어서 보다 큰 규모의 대기 운동을 예측하는데 결정적인 역할을 한다(김형진과 노의근, 1999). 이에 본 연구에서는 모델내 사용되는 경계층 물리식이 복잡 연안 지역의 바람장에도 큰 영향을 줄 것이라 예상하였다. 민감도 분석에 사용되어진 대기경계층 방법에 관한 자세한 설명은 표 2에 요약하였고, 각 실험 설계와 물리적 방안에 대해 간략히 표 3에 요약하였다.

3. 대상지역 및 사례일 분석

3.1 대상지역

본 연구의 대상지역은 한반도 남동 해안지역과 근해상지역으로 해상교통의 중심지역이며 동쪽으로는 동해와 만나고 북쪽은 울산광역시, 서쪽은 전라남도 여수시와 맞닿아 있는 곳이다. 이 지역은 불규칙하고 복잡한 지형 및 섬들로 인한 지역적 특성이 기상과 해양현상에 있어 중요한 역할을 하고 있다. 봄철 서해안 및 중국으로부터 발생하는 저기압의 영향이 이 지역 기상현상에 지배적 역할을 하고, 여름철 남해안에서 올라오는 태풍은 연안지역에 많은 강수와 바람, 해일로 인한 피해를 발생시킨다. 이처럼 한반도 남동해안은 지리적 위치 및 지형적 특성으로 인해 연안 지역 및 해양 기상장에 큰 영향을 주게 된다. 그림 1은 본 연구영역으로 모델수행을 위한 대상영역이기도 하다. 지형분포와 기상관측소 위치를 나타내었고, 서쪽으로 갈수록 복잡한 해안선을 비롯하여 많은 섬들이 있다. 연안으로는 복잡한 리아스식 해안이 위치하고 있고, 연안도시 내에는 높고 낮은 산악을 형성하고 있으며 경사는 높지 않게 해안으로 완만하게 이어지는 형태를 지니고 있다.

3.2 사례일 분석

다양한 사례에 대한 실험을 위해 해상에서의 약한 풍속 사례일과 강한 풍속 사례일에 대해 수치실험을 수행하였다. 먼저 약한 풍속 사례일로는 해무 발생이

Table 2. Summary of Planetary Boundary Layer.

Physics scheme	Unstable PBL mixing	Entrainment treatment	PBL Top
MRF	K profile+countergradient term	part of PBL mixing	from critical bulk Ri
MYJ	K from prognostic TKE	part of PBL mixing	from TKE

Table 3. A summary of numerical experiments.

	MM5 run 1 (M1)	MM5 run 2 (M2)	WRF run 1 (W1)	WRF run 2 (W2)
Cumulus			Kain-Fritsch 2	
PBL	MRF	MYJ	MRF	MYJ
LW_RAD			RRTM	
SW_RAD			Dudhia	

있었던 기간(2004년 5월 28일~5월 31일)을 선정하여 실험하였다. 일반적으로 밀면이 지면과 접하고 있으면 안개(fog), 떨어져 있으면 구름(cloud)이라고 한다. 안개 속에서 대기는 습하고 차갑게 느껴지며, 상대습도는 100%에 가깝고 약한 풍속을 나타낸다. 본 연구에서는 일반적인 정의와 동일하게 수평시정이 1 km 미만인 경우를 안개로 정의하였다. 강한 풍속 사례일로는 한반도 남부, 특히 마산 지역에 큰 피해를 준 태풍 매미발생 기간(2003년 9월 11일~9월 14일) 동안을 선택하여, 매미가 9월 12일 저녁에 마산 부근에 상륙하여 13일 오전쯤 동해상으로 빠져 나가는 모습을 모의하고자 하였다.

4. 수평바람장 분석

4.1 해무 사례 수치실험을 통한 수평바람장 분석 및 관측자료와의 비교·분석

해무사례일 동안의 실험 결과 중 수평바람장 분포를 살펴보았다. 그림 2는 해무가 발생하기 시작한 시간인 2004년 5월 29일 1800 LST의 모의 결과를 나타낸 것이다. 여기서, Run 1 (M1, a)은 MM5의 MRF 물리적 모수화 방안으로 실행한 결과이고, Run 2 (M2, b)는 MM5의 MYJ로, Run 3 (W1, c)는 WRF의 MRF로, Run 4 (W2, d)는 WRF의 MYJ로 실행한 바람장 분포도이다. 대체로 WRF가 MM5보다 약한 풍

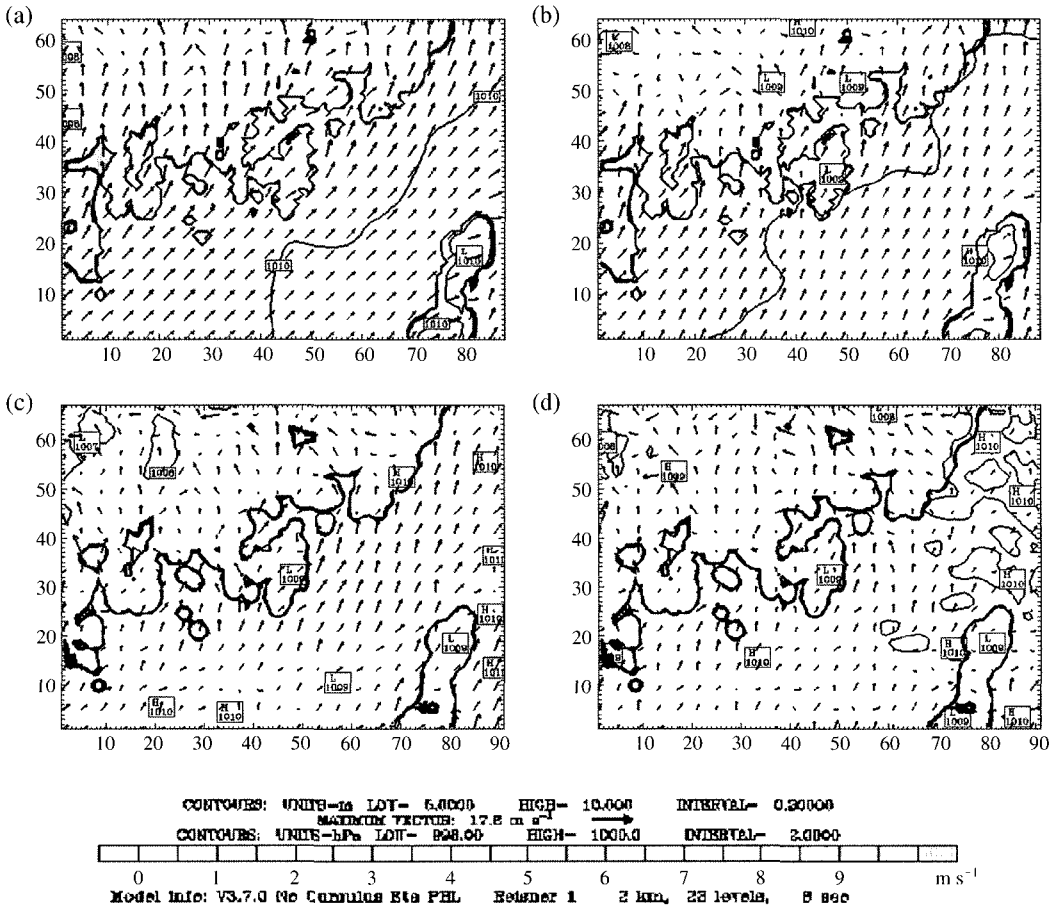


Fig. 2. Simulated wind fields of (a) M1, (b) M2, (c) W1, and (d) W2 at 1800 LST on 29 May, 2004. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to 10 m s⁻¹ (→ indicate 10 m s⁻¹).

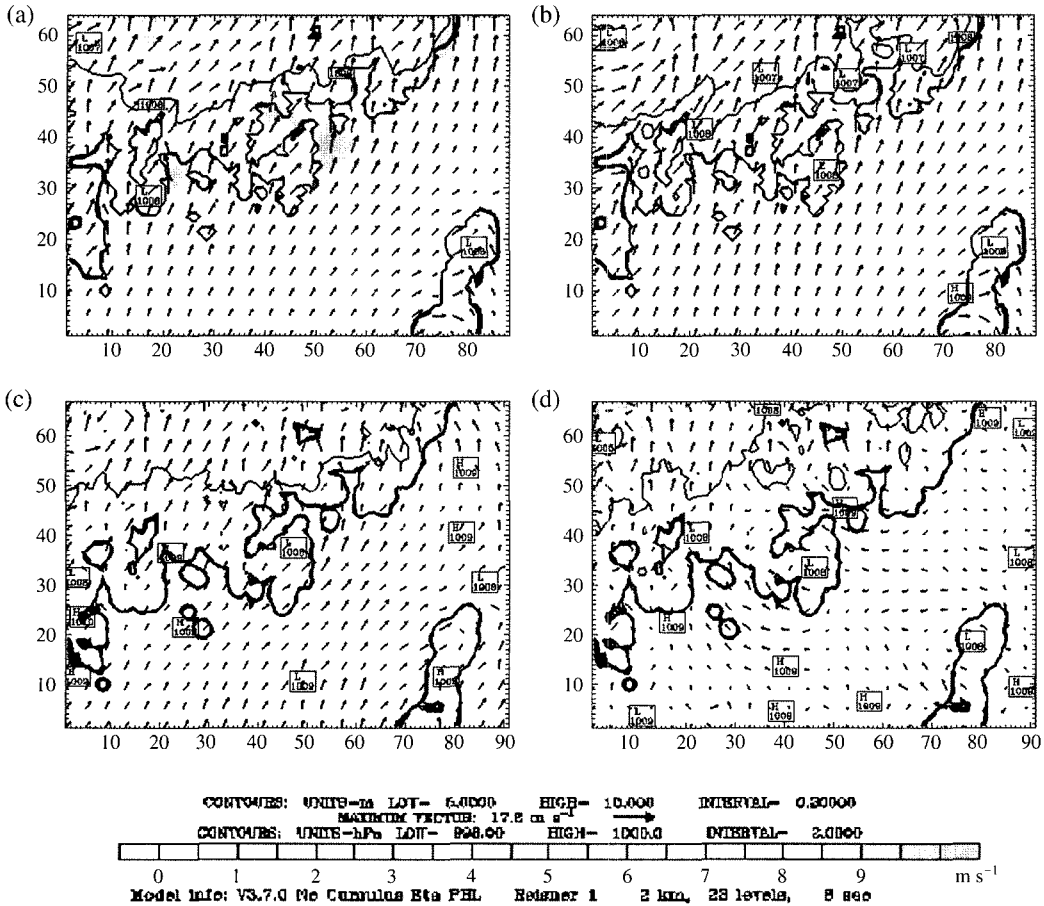


Fig. 3. Simulated wind fields of (a) M1, (b) M2, (c) W1, and (d) W2 at 1500 LST on 30 May, 2004. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to 10 m s⁻¹ (→ indicate 10 m s⁻¹).

속 분포를 보이며, MYJ 방안을 통한 결과가 MRF 방안 결과보다 더 약한 풍속을 나타내었다. 하지만 전역에 걸쳐 남서풍으로 불어나가는 풍향 패턴은 거의 동일한 결과를 보여주었다. 이 시간대는 4 m s⁻¹ 이하의 낮은 분포를 보이는 결과가 해안을 따라 해무를 발생시키기 좋은 기상요소로 작용하며, 이 시간대의 부산 기상대 관측 시정값은 0.5 km 이하로 전반적으로 WRF의 결과들((c), (d))이 약한 풍속장을 잘 나타내었으며, 특히 MRF를 이용한 MM5 실험 결과인 (a)는 해안을 따라 6 m s⁻¹ 이상의 높은 풍속을 보이면서 이 시간대의 약한 풍속을 제대로 설명하지 못하였다. 해무 발생일 동안 해안을 따라 약한 풍속을 나타내는 현상은 WRF가 MM5 보다 더 잘 모의하는

것으로 나타났으며, MRF 물리적 방안보다는 MYJ 물리적 방안을 이용한 지상바람장 모의 결과가 해무발생일의 약한 풍속 특성을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

해무가 발생하여 하루 동안 지속되고 난 후의 시간인 5월 30일 1500 LST의 바람 패턴을 그림 3에 분석하였다. 여전히 낮은 시정값을 보이는 해무 발생영역을 MM5의 두 결과 ((a), (b))는 풍속을 과대평가하고 있음을 알 수 있으며, MRF 물리식을 사용한 WRF 결과 역시 강한 풍속을 나타내고 있다. WRF의 MYJ 물리적 방안을 사용한 실험결과 (d)가 타당한 수평분석장을 보일 뿐 아니라, 해무발생일의 전체적인 약한 풍속 수평장을 잘 모의하고 있었다. 관측 값

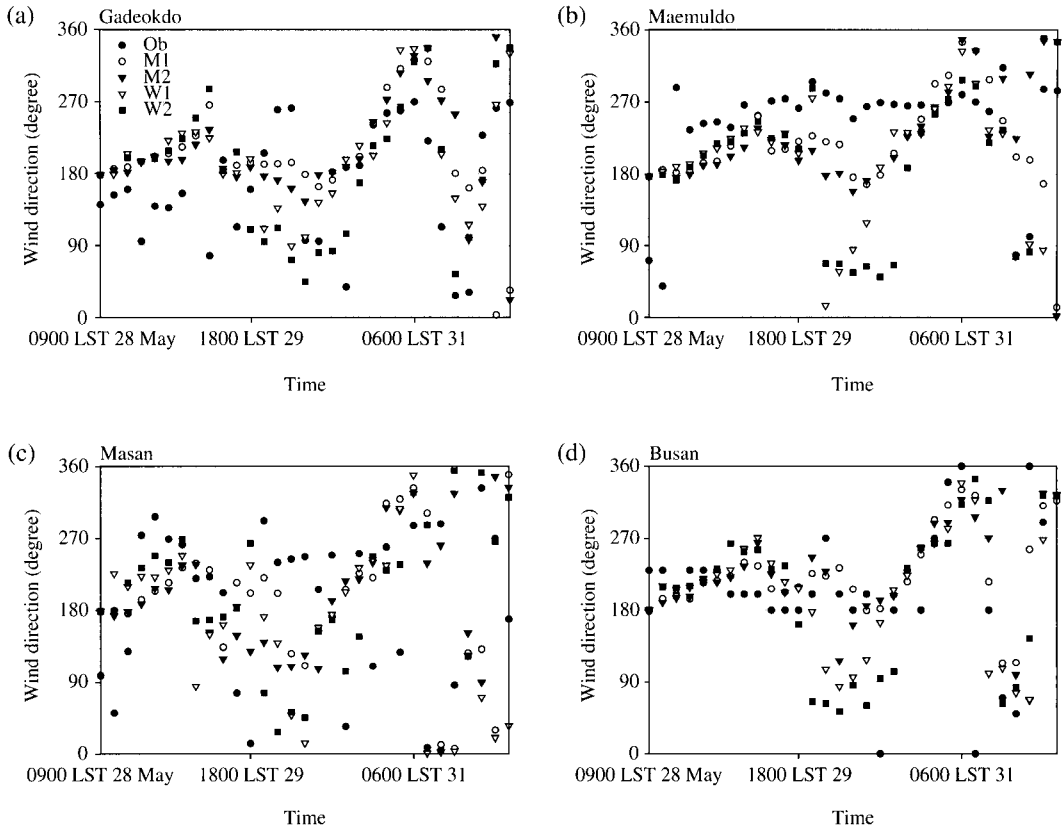


Fig. 4. Time series of observed and simulated wind direction during sea fog period (2004. 5. 28. 0900 LST~6. 1. 0300 LST, three-hour intervals) at (a) Gadeokdo, (b) Maemuldo, (c) Masan, and (d) Busan.

과의 검증이 이루어지지 않은 상태라 정확히 어떤 결과물이 더 우수하다고는 판별하기 어렵지만, MM5 보다는 WRF의 경우가 본 연구 사례일인 해무발생 시간 동안의 약한 풍속장을 잘 나타내며, 특히 MYJ의 물리적 모수화 방안을 사용한 결과는 육지의 강한 풍속과 해상과 연안의 약한 풍속 패턴을 보이며, 송진만 영역에서 서이말과 가덕도의 지형물의 영향을 받아 약한 해풍이 돌아서 육지로 들어가는 것을 잘 모의해 주었다. 반면 MM5의 결과들은 풍속의 강약의 구분없이 대체로 과대 모의 된 것으로 나왔다. 그러나 전반적으로 해상의 바람장을 살펴 볼 때, 모든 실험 결과들이 유사하게 남서풍이 조금 강하게 불면서 해안의 정체된 공기괴를 움직임으로 해무소멸현상을 보이기 시작하였다. 하지만 모의의 우수성 여부는 더 정확한 검증을 수반하여야 하겠다.

지금까지 해무 발생의 약한 사례일 동안을 실험한 결과분석에 따르면, 다소 약한 풍속을 나타내어야 하는 기간과 영역에서 MM5보다 WRF가 타당한 결과를 나타내는 것을 보였고, MYJ의 경계층 물리 방안이 해안선을 따라 약한 풍속분포를 잘 나타내었다. 하지만 풍향과 함께 더 자세한 검증은 관측 값들의 내삽에 따른 동일한 격자점들을 중심으로 판정하여야 할 것이다.

해무 사례일 연안지역의 결과 검증을 위해, 가덕도, 매물도, 마산, 부산 지역을 중심으로 2004년 5월 28일 0900 LST에서 6월 1일 0300 LST까지 3시간 간격의 풍향과 풍속의 시계열을 분석하였다(그림 4와 그림 5). 풍향의 경우, 모든 지점이 5월 29일 0000 LST를 전후하여 관측 값과의 차이가 클 뿐만 아니라, 각 모의 결과들 간의 값들도 큰 차이를 보였다.

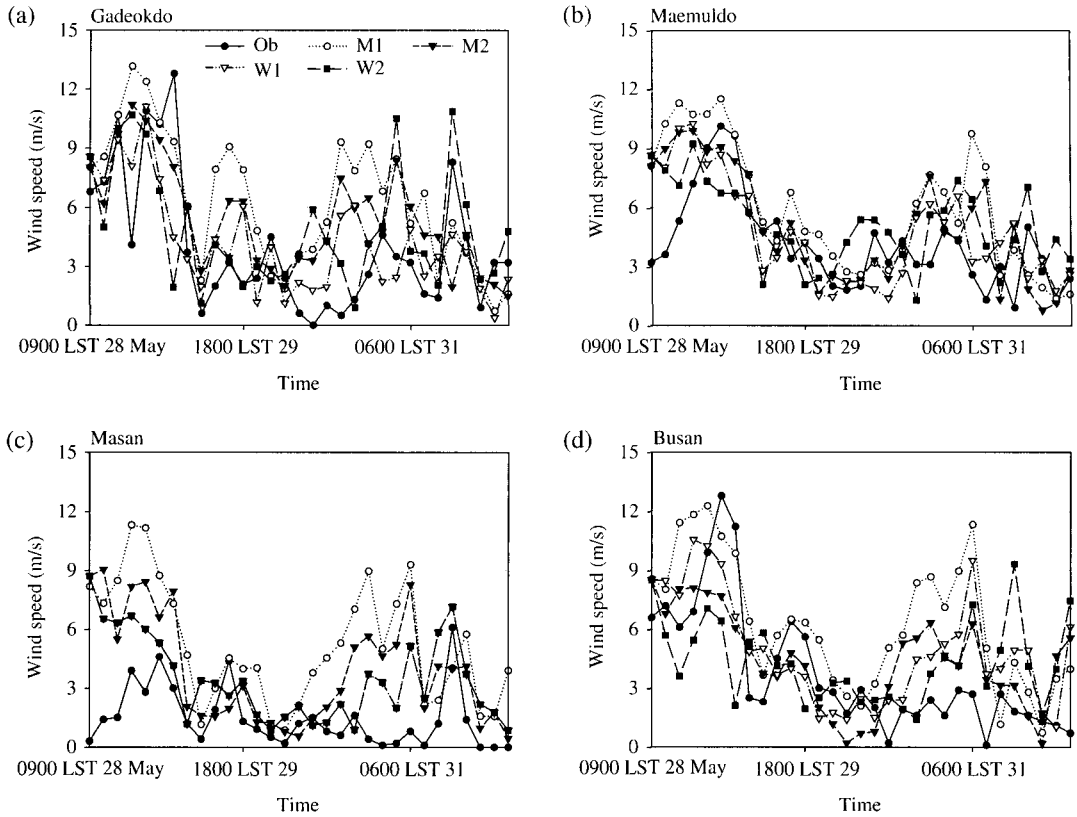


Fig. 5. Time series of observed and simulated wind speed during sea fog period (2004. 5. 28. 0900 LST ~ 6. 1. 0300 LST, three-hour intervals) at (a) Gadeokdo, (b) Maemuldo, (c) Masan, and (d) Busan.

이것은 모형과 PBL 물리적 모수화 방안들간의 민감도가 높은 것을 알 수 있지만, 특별히 어떤 실험이 관측치와 잘 일치한다고는 볼 수 없다. 하지만 앞의 수평장에서 알 수 있듯이 WRF모형의 MYJ 물리적 모수화 방안을 사용한 실험 결과(W2)가 연안과 육지에서 다양한 풍계로 지형을 잘 모의해주는 것으로, 몇 시간대들의 관측치와 일치하는 좋은 모델값을 나타내었다. 또한 그림 5에서 보듯이 수치모의된 풍속의 시계열 변화들도 관측치의 추세와의 일치도가 크게 떨어지고 있을 뿐만 아니라, 각 실험간의 결과 차이도 크게 나타났다. 하지만 5월 29일 1500 LST에 마산의 풍속시계열분석을 보면, MM5 모형을 통한 MRF 물리적 모수화 방안으로 실험한 결과(M1)가 4.5 m s^{-1} 로 관측치 4.4 m s^{-1} 를 거의 정확히 예측하고 또한 부산의 경우도 같은 시간대에 M1의 결과가 6.499 m s^{-1} 로 관측치 6.4 m s^{-1} 를 정확히 모의하였다.

이렇게 단순히 한 시간대 값만을 정확히 모의했다고 그 방안과 모형의 적용이 필요하다고는 볼 수 없다. 위의 분석에서 WRF 모형의 MYJ 방안이 풍향에는 정확도가 높으나, 풍속 또한 그 예측율이 높다고는 단언할 수 없다. 전체적으로 모의된 풍향과 풍속이 관측 값과 차이를 보이고 있으며, 이것은 적당한 모형의 선택과 유용한 물리적 방안의 적용과 더불어 다양한 관측자료를 이용한 초기치의 개선과 지역의 특성을 반영하는 정밀 지형자료 사용의 중요성을 시사하고 있다.

4.2 태풍 사례 수치실험을 통한 수평바람장 분석 및 관측자료와의 비교 · 분석

본 사례 특성상, 국지적 영향보다는 태풍에 의한 중관규모의 흐름을 이해하기 위해서 연구영역 중 가장 성긴 도메인부터 분석해 볼 필요가 있다. 이를 위

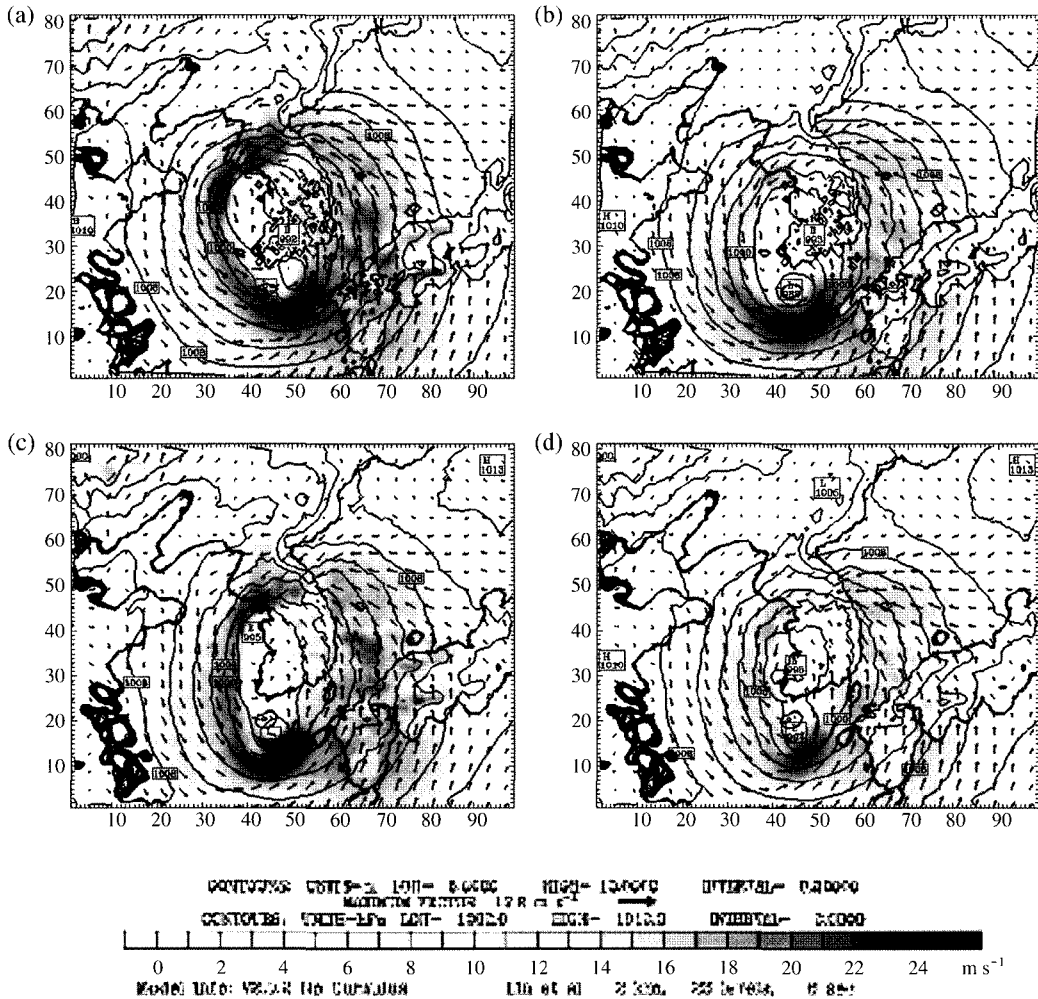


Fig. 6. Simulated wind fields of (a) M1, (b) M2, (c) W1, and (d) W2 in domain1 at 2100 LST on 12 September, 2003. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to 25 m s⁻¹ (→ indicate 25 m s⁻¹).

해 태풍 매미가 사천시 부근해안으로 상륙한 시간대인 2003년 9월 12일 2100 LST와 태풍이 울진을 통과해서 동해상으로 빠져나간 시간대인 9월 13일 0300 LST의 수평바람장을 분석해 보았다(그림 6과 그림 7).

그림 6은 한반도 남해안에서 강한 태풍의 중심부 위치를 보이며 모든 실험의 경우 유사한 결과를 보였으나, 저기압 중심의 위치는 약간의 차이를 나타내었다. 특히 (c)의 경우, 제주도에서 989 hPa, 순천 지점 정도에서 993 hPa의 낮은 기압을 보임으로써, 남해안 지역의 강한 저기압 영향권을 가장 잘 설명해

주고 있으며, 풍향과 풍속의 경우는 거의 모든 결과가 비슷하게 나타났다. 13일 0300 LST의 바람장을 살펴보면(그림 7), 저기압 중심이 함안 부근에 자리 잡고 중심 주위로 반시계 방향으로 바람장이 형성하고 있음은 거의 동일하지만 MM5의 MRF 물리적 모수화 방안으로 실험한 (a)의 경우는 저기압 중심부가 다소 높은 곳에 위치함으로써 부산 근해상의 남서풍을 서풍 계열의 바람으로 모의하기에 다른 결과들과는 상당한 차이를 보여주었다. WRF의 MRF 물리적 방안으로 실험한 (c)의 경우는 부산 근해상의 가장 강한 풍속을 모의하였다.

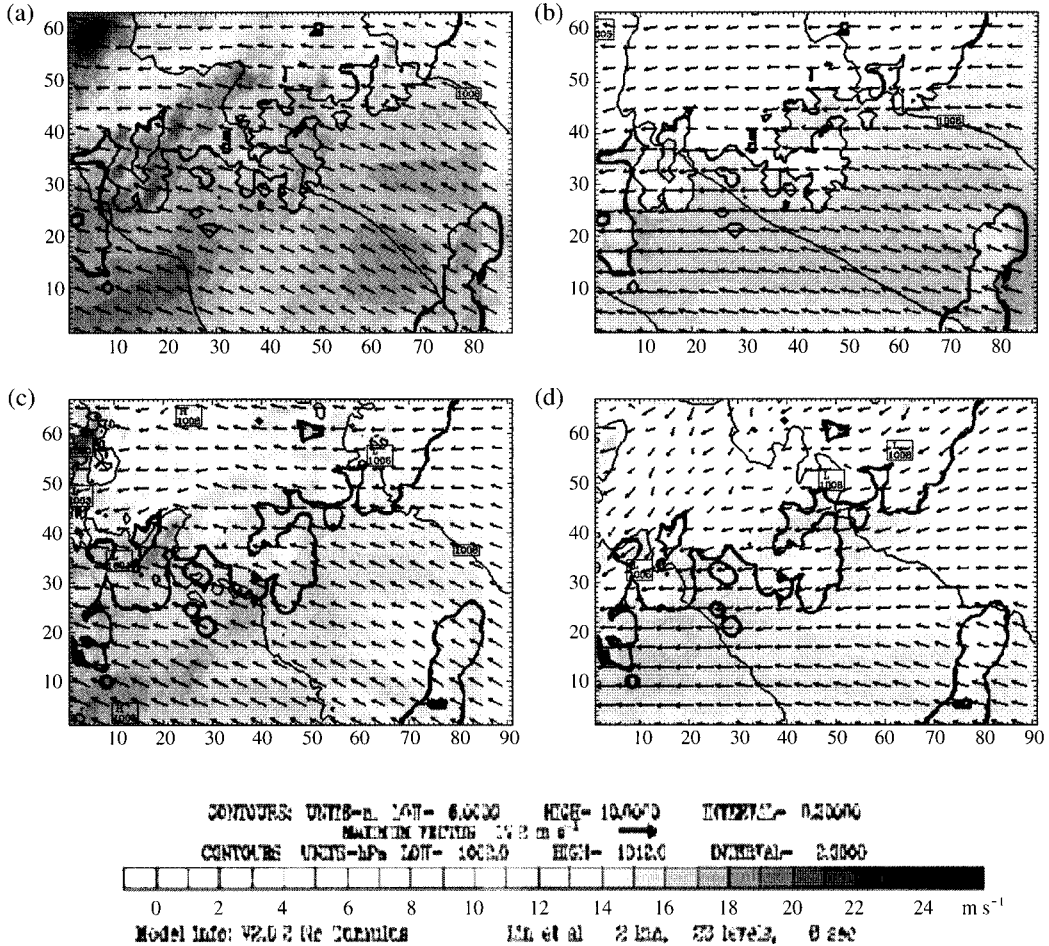


Fig. 8. Simulated wind fields of (a) M1, (b) M2, (c) W1, and (d) W2 at 0900 LST on 12 September, 2003. Shaded contours indicates wind speed ranging from 0 to 25 m s⁻¹ (→ indicate 25 m s⁻¹).

(c)가 전체적으로 남동 연안지역과 남해 동부 해상에서의 25 m s⁻¹ 이상의 가장 강한 풍속 분포를 나타내었고, MM5의 MRF 결과인 (a)는 본 연구영역의 북동쪽에 위치하고 있는 기장지역 부근의 해상 바람장을 강하게 모의하였다. WRF의 MYJ 물리방안을 사용한 결과는 MRF 물리방안을 사용한 결과와는 달리 연안지역보다는 해상에서의 바람을 강하게 나타내었다.

태풍과 같이 강한 풍속을 보이는 사례일 동안에는 중관 패턴을 따르기 때문에 모형간의 수평 바람장의 차이보다는 적용되는 경계층 물리적 모수화 방안들간의 차이에 따라 보다 다른 결과를 보였다. 큰 풍향

변화는 보이지 않았으며, 태풍의 영향권에 있는 시간대에는 물리적 방안의 적용에 따라 상이한 풍속 분포를 나타내었다. 특히 WRF 모형에서 MRF의 물리적 모수화 방안을 사용한 바람장의 결과가 태풍이 동해로 빠져나가면서 나타나는 강한 풍계현상을 잘 묘사한 것으로 사료되어진다.

강한 풍속 사례일인 태풍 매미 사례일의 풍향과 풍속의 시계열 분석을 살펴보았다(그림 10과 그림 11). 하지만 해무 사례일과는 달리 강한 바람에 의해 결측치가 많이 발생하여 부산, 통영, 남해, 거제 기상대 관측치들을 대상으로 분석하였다. 그림 10의 풍향 시계열의 경우는 남해를 제외하고는 모든 실험 결과

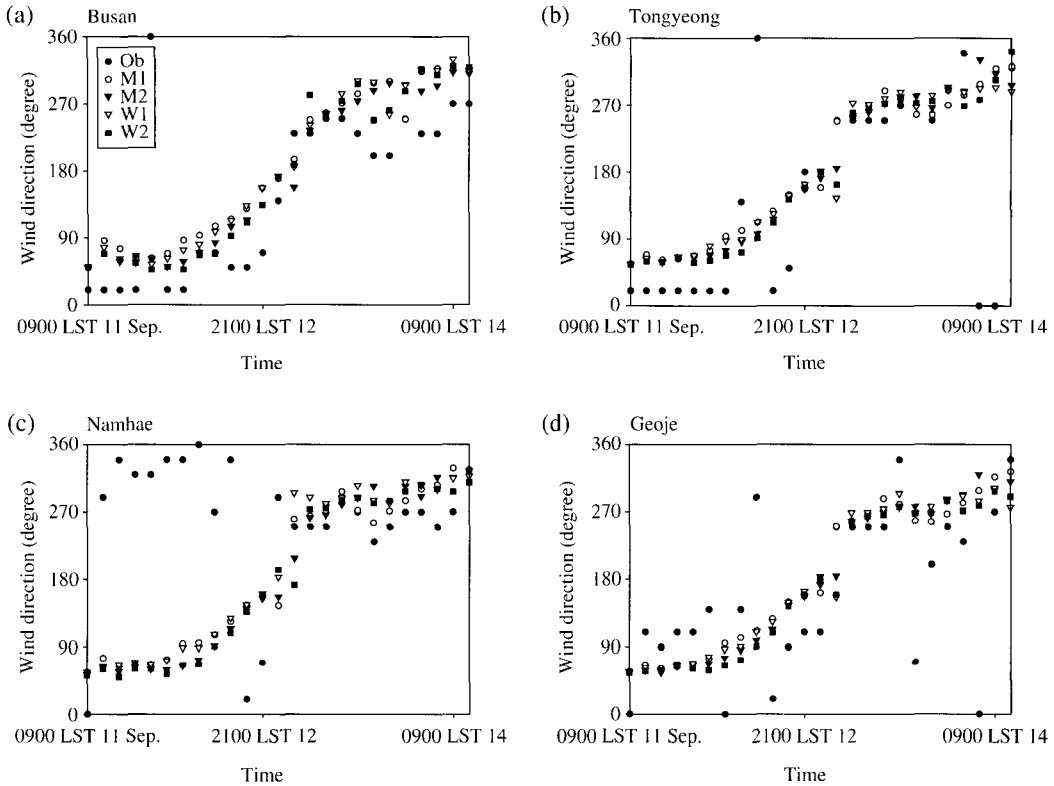


Fig. 10. Time series of observed and simulated wind direction during Maemi typhoon period (2003. 9. 11. 0900 LST ~ 9. 14. 0900 LST, three-hour intervals) at (a) Busan, (b) Tongyeong, (c) Namhae, and (d) Geoje.

도, 경압성, 지표면 특성 등 복잡한 대기 경계층 역학의 지배를 받고 있는 해상풍의 PBL scheme에 따른 바람장 모의 결과를 비교해보았다.

다양한 사례에 대한 실험을 위해, 먼저 약한 풍속 사례일로는 해무 발생이 있었던 기간 (2004년 5월 28일 ~ 5월 31일)을 선정하여 실험하였고, 강한 풍속 사례일로는 마산 지역에 피해를 많이 가져다 준 태풍 매미발생 기간 (2003년 9월 11일 ~ 9월 14일) 동안을 선택하여, 매미가 9월 12일 저녁에 마산 부근에 상륙하여 13일 오전쯤 동해상으로 빠져 나가는 모습을 모의하고자 하였다.

약한 풍속 사례일인 해무 발생일 동안을 실험한 결과분석에 따르면, 다소 약한 풍속을 나타내어야 하는 기간과 영역에서는 MM5보다는 WRF가 타당한 결과를 나타내는 것을 보였고, 특히 WRF 모델의 MYJ 물리적 모수화 방안을 사용한 실험 결과가 연

안과 육지에서 다양한 풍계로 지형을 잘 모의해주는 값을 제시하였고 해상에서의 약한 바람을 잘 나타내었다. 이는 현재 가장 널리 사용되는 MRF 물리식에 사용되어지는 K-profile 모형은 다양한 크기의 에디의 효과를 동시에 고려해줄 수 있다는 장점과 에단 방정식을 풀 필요가 없어 계산 시간이 절약된다는 등의 장점에도 불구하고 에디 점성 계수의 연직 분포 자체가 아직 경험적인 방법에 많이 의존하는 문제점을 갖고 있으나 MYJ 물리식의 경우, TKE와 그 국지 연직 혼합을 잘 예측하여 복잡한 연안지역의 국지 순환을 잘 모의하여 약한 풍속 사례일 동안의 해상풍을 가장 유사하게 모의한 것으로 판단된다. 그리고 약한 풍속 사례일은 PBL 물리식에 따른 수평 바람장의 민감도 보다는 모형의 frame 차이에 따른 민감도가 더 크게 나타났다. 태풍과 같이 강한 풍속을 보이는 사례일 동안에는 종관 패턴을 따르기 때

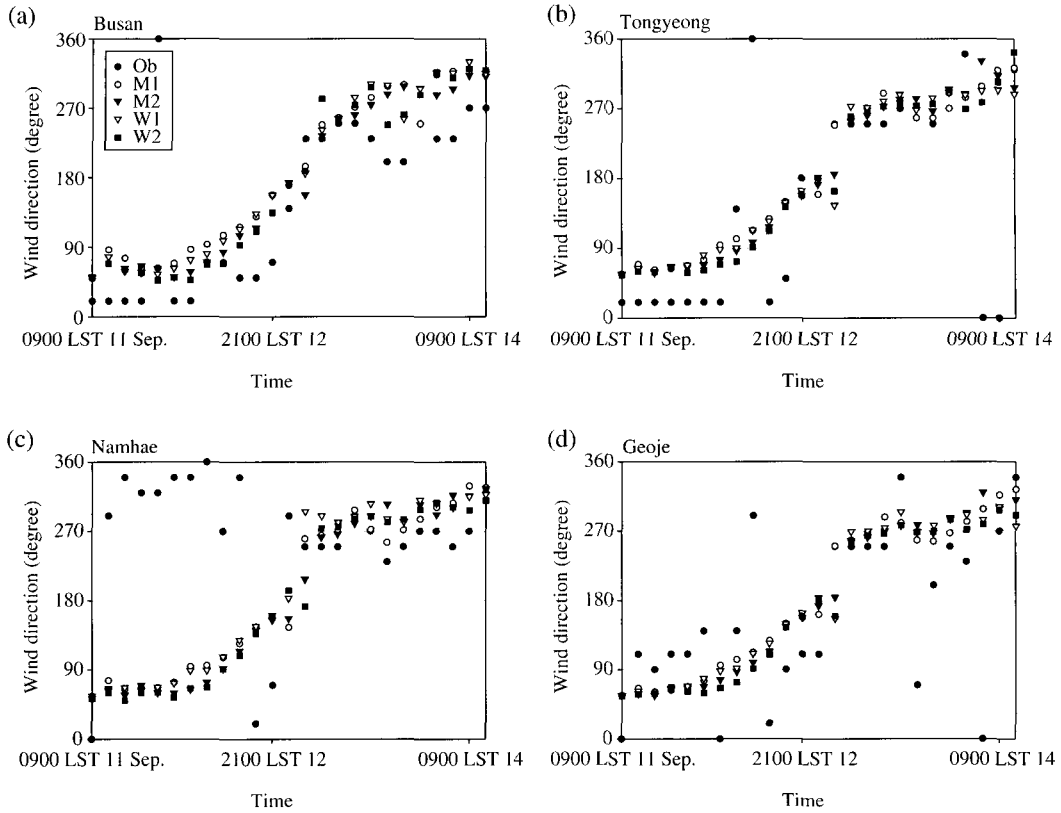


Fig. 11. Time series of observed and simulated wind speed during Maemi typhoon period (2003. 9. 11. 0900 LST ~ 9. 14. 0900 LST, three-hour intervals) at (a) Busan, (b) Tongyeong, (c) Namhae, and (d) Geoje.

문에 모형과 물리적 모수화 방안들간의 차이에 따른 큰 풍향 변화는 보이지 않았으나 풍속분포는 큰 차이를 보였다. 특히 WRF 모형에서 MRF의 물리적 모수화 방안을 사용한 바람장의 결과가 태풍이 동해로 빠져나가면서 나타나는 강한 풍계현상을 잘 묘사하였고, 모형의 frame 차이보다는 PBL 물리식에 따른 수평바람장의 민감도가 더 크게 나타났다. 결론적으로 두 사례 모두 WRF 모형의 결과가 좋은 것으로 판단되며, 약한 풍계는 MYJ 물리적 모수화 방안을 사용하였을 때가, 강한 풍계를 보이는 실험에서는 MRF 물리적 모수화 방안을 사용한 결과가 해상풍을 향상시킬수 있는 것으로 판별되었다. 그러나 국지적인 영향을 많이 받는 복잡 연안지역의 바람장의 경우, 모든 물리적 방안의 적용에 한계가 있음을 나타내었고 앞으로 보다 향상되고 상세화된 바람장 모의 개선 연구를 위해서는 적당한 경계층 물리식의 선택

뿐만 아니라 고해상도 관측자료들의 사용으로 LAPS (Local Analysis and Prediction System)를 이용한 초기장 개선을 이룰 뿐 아니라 정밀 지형자료를 이용한 모델 개선이 필요하리라 사료된다. 추후, 이와 같은 개선된 모델링을 수행하여 관측값들의 내삽에 따른 동일한 격자점들을 중심으로 결과값을 분석함과 동시에 통계적인 방법을 통한 정량적인 분석을 수행할 것이며 또한 더 많은 사례일의 실험으로 정확한 결과를 도출할 예정이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- 김규명 (1989) 한반도 근해의 해상풍 모형, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 87pp.
- 김규명, 강인식 (1992) 해상풍 산출 모형과 역학, 28(1), 1-8.
- 김형진, 노의근 (1999) 새로운 큰에디모사 모형에 의한 대류 경계층의 모사 및 아격자 모수화의 영향 분석, 한국기상학회지, 35(4), 587-598.
- 노유정, 홍성유 (2002) 한반도 집중호우 사례에 대한 수치 모형의 비교 검증, 대기지, 11(1), 356-359.
- 민경덕 (1974) 동계 황해상의 열 및 수증기 수지해석과 이들이 시베리아 기단의 변질에 미치는 영향, 한국기상학회지, 10, 1-10.
- 박세영, 정성훈, 장동연, 최정희 (2002) 2002년 8월의 WRF 모델과 MM5 모델의 수치실험 비교 검증, 대기지, 12(3), 382-385.
- 변건영 (2005) MM5와 WRF 모형의 한반도 겨울 강수의 비교, 연세대학교 대학원 석사학위 논문, 96pp.
- 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.
- 안중배, 정창희 (1984) 동해에서 발달한 저기압과 연관된 에너지 수지에 관한 연구, 한국기상학회지, 20, 22-34.
- 함수련, 박선주, 방철한, 정병주, 홍성유 (2005) WRF, MM5, RSM 모형에서 모의한 2004년 7월 11-18일의 동아시아 몬순의 비교, 대기지, 15(2), 2005, 91-99.
- Anthes, R.A., Y.H. Kuo, and J.R. Gyakum (1983) Numerical simulation of a case of explosive marine cyclogenesis, Mon. Wea. Rev., 111, 1174-1188.
- Chen, F. and J. Dudia (2001) Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation, Mon. Wea. Rev., 129, 569-585.
- Choi, J.-T., S.-Y. Lee, and T.-G. Chang (2001) A Comparison of WRF and MM5 in East Asia Region, Atmosphere, 11(3), 488-489.
- Danard, M. (1988) A diagnostic method for computing the surface wind from the geostrophic wind including the effects of baroclinicity, Mon. Wea. Rev., 116, 2712-2716.
- Dudhia, J. (1989) Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, J. Atmos. Sci., 46, 3077-3107.
- Hoxit, L.R. (1974) Planetary boundary layer winds in baroclinic conditions, J. Atmos. Sci., 31, 1003-1020.
- Hsueh, Y. and R.D. Romea (1983) A comparison of observed and geostrophically calculated wintertime surface winds over the East China Sea, J. Geophys. Res., 88, 9588-9594.
- 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.
- Marsdon, R.F. (1987) A comparison between geostrophic and directly measured surface winds over the Northeast Pacific Ocean, Atmos. Ocean, 25, 387-401.
- Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere : RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, J. Geophys. Res., 102(D14), 16663-16682.