

연안지역 특성에 따른 상세 토지피복도 적용 효과 및 기상장에 미치는 영향 분석

The Application of High-resolution Land Cover and Its Effects on Near-surface Meteorological Fields in Two Different Coastal Areas

정 주 희 · 김 유 근*

부산대학교 지구환경시스템학부

(2009년 6월 16일 접수, 2009년 8월 7일 수정, 2009년 8월 11일 채택)

Ju-Hee Jeong and Yoo-Keun Kim*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

(Received 16 June 2009, revised 7 August 2009, accepted 11 August 2009)

Abstract

In this study, the effects of high-resolution land cover on the simulation of near-surface meteorological fields were evaluated in two different coastal regions using Weather Research and Forecasting (WRF) model. These analyses were performed using the middle classification land cover data upgraded by the Korean Ministry of Environment (KME). For the purpose of this study, two coastal areas were selected as follows: (1) the southwestern coastal (SWC) region characterized by complex shoreline and (2) the eastern coastal (EC) region described a high mountain and a simple coastline. The result showed that the application of high-resolution land cover were found to be notably distinguished between the SWC and EC regions. The land cover improvement has contributed to generate the realistic complex coastline and the distribution of small islands in the SWC region and the expansion of urban and built-up land along the sea front in the EC region, respectively. The model study indicated that the improvement of land cover caused a temperature change on wide areas of inland and nearby sea for the SWC region, and narrow areas along the coastal line for the EC region. These temperature variations in the two regions resulted in a decrease and an increase in land-breeze and sea-breeze intensity, respectively (especially the SWC region). Interestingly, the improvement of land cover can contribute large enough to change wind distributions over the sea in coastal areas.

Key words : High-resolution, Land cover, Improvement, Two different coastal areas, Near-surface meteorological fields, WRF, KME, SWC, EC

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-510-2282, E-mail : kimyk@pusan.ac.kr

1. 서 론

연안지역은 자연재해가 반복되는 지역으로 최근 15년간 전국에서 발생한 1,000여 건의 자연재해 중 약 41%인 409건이 해일, 해수범람, 태풍 등에 의한 연안재해로 그 피해 규모는 2조 1000억 원에 달한다(해양수산부 보도자료). 이와 같이 매년 태풍, 해일 등 자연재해로 인한 피해가 발생하고 있으며 연안개발과 함께 인구 및 시설 증가로 그 피해 규모 및 피해액이 가중되고 있다. 특히 우리나라 연안지역은 항만, 임해공업단지, 임해발전소건설, 간척사업, 고밀·고층화된 건물단지 증가 등 많은 연안개발이 이루어지고 있어 연안지역에 대한 보다 구체적이고 정확한 기상 예측의 필요성이 대두되었다(김유근 등, 2005; 배주현 등, 2005).

수치모델을 통한 연안지역의 정확한 기상 예측을 위해서는 고해상도 관측 자료를 활용한 초기장 개선뿐만 아니라 상세한 지표자료의 적용이 필요하다. 연안지역의 국지순환은 종관장의 영향뿐만 아니라 복잡한 해안선과 크고 작은 섬들로 인한 지역적 비균질 상태의 특성이 혼합되어 더욱 복잡하게 나타난다(이화운 등, 2000; Pielke, 1984). 기상모델에서 이러한 연안지역의 특성을 현실적으로 반영하기 위해서는 지표면의 정확하고 상세한 토지피복도 자료가 고려되어야 한다. 토지피복도(land-cover map)는 위성사진을 주된 자료로 사용하며 지표면의 자연 상태를 분석한 지도로서 수치모델이나 지역기후 모델 등의 지면경계조건뿐만 아니라 지면온도 산출 및 농업기상 등에서도 중요한 자료로 사용된다(Shu and Lee, 2004). 수치모델에서 토지피복도의 역할은 각 토지피복 상태에 대해 반사도(albedo), 수분량(moisture availability), 거칠기 길이(roughness length), 단위용적당 지표면 열적 관성(thermal inertial) 등의 물리적 성질이 다르게 적용되어 보다 정확한 열환경 구조와 바람장의 변화를 모의한다. 이에 토지피복도 변화에 따른 열환경 변화를 보다 상세하게 분석하기 위하여 수치모델링을 이용한 많은 연구들이 진행되고 있다(원경미 등, 2008; Cheng and Byun, 2008; 문윤섭과 구윤서, 2006; Lam *et al.*, 2006).

수치모델에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 자료는 미국 USGS(U.S. Geology Survey) 토지피복도

이다. 이 자료는 NOAA/AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 1 km 격자로 산출된 자료로 광역(대륙/전지구) 환경연구 및 모델응용을 위해 작성되었다(Loveland *et al.*, 2000). 그러나 USGS 자료는 과거 10년 전의 자료로서, 1990년대 이후 우리나라의 도시 확장 및 위성도시의 발달, 간척사업으로 인한 지표면 상태의 변화와 같은 토지피복도의 변화를 상세히 나타내지 못하고 있는 실정이다. 강전호 등(2007)은 USGS 자료가 한반도를 대부분 사바나 지역으로 분류하고 도시와 농지를 제외하고는 토지피복도 분류가 거의 일치하지 않는다고 밝혔다. 이러한 잘못된 토지피복도의 적용은 종관규모의 일기계와 불규칙하고 복잡한 지형 및 섬들로 인한 지역적 특성이 결합되어 복잡한 기상현상을 나타내는 연안지역의 정확한 기상예측을 더욱 어렵게 할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 환경부(KME, Ministry of Environment Republic of Korea)에서 지리정보시스템(GIS, Geographic Information System)과 함께 구축한 중분류 토지피복도 자료를 이용하여 고해상도 수치 토지피복도 입력자료로 변환하여 기상모델에 적용하였다. 대상지역은 같은 연안지역이라도 복잡한 해안선과 다양한 섬들의 효과로 기상장이 형성되는 남서해안지역과 높은 산맥과 해양의 작용이 중요하게 작용하는 동해안지역을 선정하였다. 이를 통해 연안지역 특성에 따른 환경부 상세 토지피복도의 개선 효과를 분석하고, 남서해안지역과 동해안지역의 토지피복도 개선 효과가 기상장 변화와 분포 특성에 어떠한 차별적인 영향을 주는지를 제시하고자 하였다.

2. 모델 및 실험설계

본 연구에서는 연안지역의 복잡한 대기순환을 이해하고 분석하기 위하여 WRF(Weather Research and Forecasting) 기상모델을 사용하였다. WRF는 완전 압축성 비정수계(Fully compressible non-hydrostatic) 방정식을 사용하며, 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하고 연직 격자로는 높이와 지형에 근거하여 새로 추가된 Eulerian 질량 좌표계(mass-based terrain following coordinate)를 사용한다(Skamarock *et al.*, 2005). 모델링은 10, 3.3, 1.1 km(남서해안지역), 1.1 km(동해안지역)의 수평격자를 갖는 4개의 도메

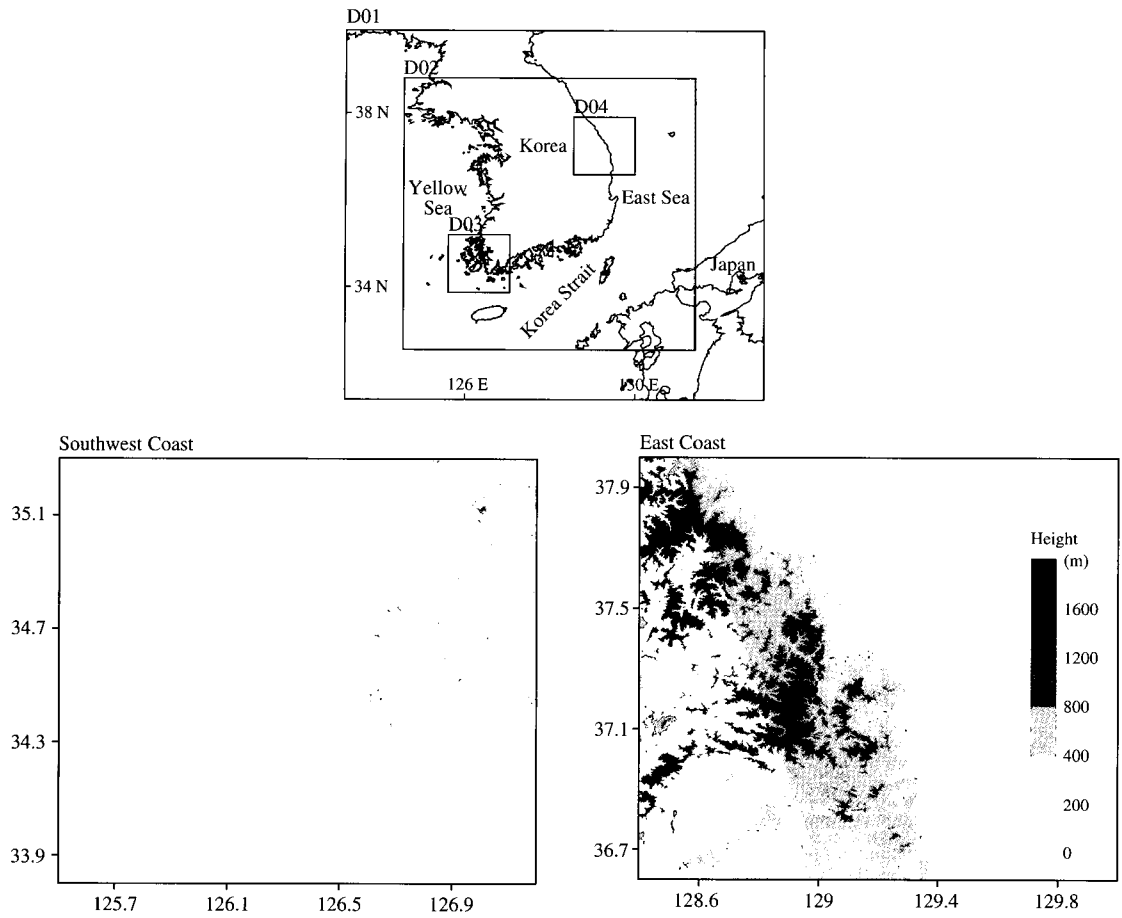


Fig. 1. The nested model domains for WRF simulation. Lower figure is a zoom of the target area of Southwest (D03) and East (D04) coast and the filled contour represents the elevation above sea level.

Table 1. Domain configuration.

	D01	D02	D03	D04
Cells in x-direction	94	187	135	135
Cells in y-direction	94	187	135	135
Z-levels	28	28	28	28
Resolution (km)	10	3.3	1.1	1.1
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch	-	-	-
Planetary boundary layer		YSU		
Microphysics		WRF Single-Moment 6-class		
Radiation (long/shortwave)		RRTM/Dudhia		
Surface layer		MM5 similarity		
Land surface		Noah LSM		

인으로 구성하였으며(그림 1), 연직격자는 28층을 사용하였다. 초기 및 경계조건은 기상청에서 3시간 간

격으로 생성하고 있는 30 km RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)와 1도 FNL (Glo-

bal Final Analysis) 지표자료, 0.5도 SST (Sea Surface Temperature) 자료를 이용하였다. 모델에 사용된 물리 과정과 도메인의 상세 정보는 표 1에 제시하였다. 연

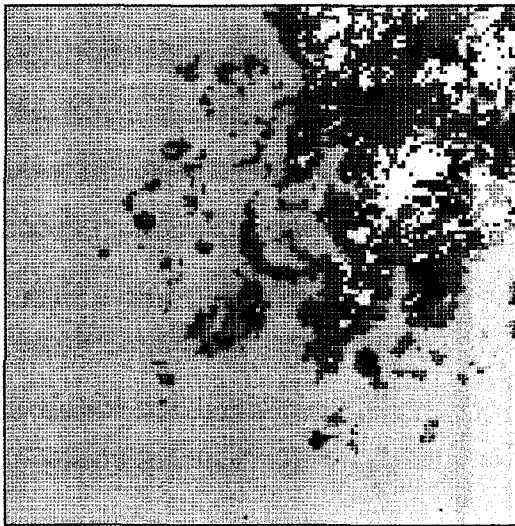
구 사례일은 강수일을 제외하고 중관장의 영향이 약 하여 국지풍의 발달이 뚜렷하게 나타난 2007년 8월 23일 0000 LST부터 26일 0000 LST로 선정하였으며, 모델 초기조건의 불확실성에 따른 영향을 최소화하기 위하여 첫 하루(24시간)는 spin-up 기간으로 하였다.

한반도는 큰 산맥들이 북부와 동부에 치우쳐 있고 삼면이 바다로 둘러싸여 있어 같은 한반도에 위치해

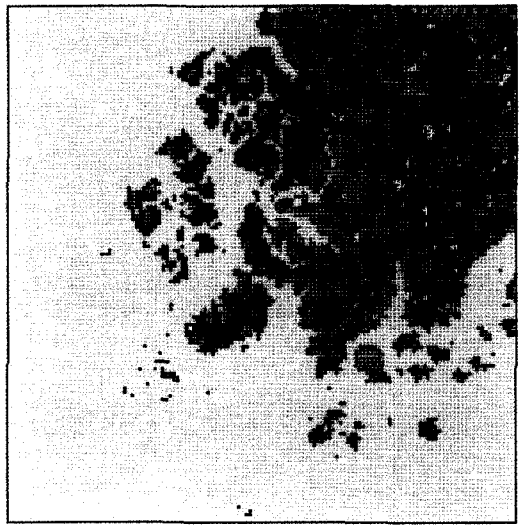
Table 2. Description of experiment.

Experiment No.	Land cover	Topography
EXP_U	USGS	SRTM
EXP_K	KME	SRTM

D03 (USGS)



D03 (KME)



Land-cover category	USGS		KME		Variation
	Pixels	Percent	Pixels	Percent	Percent
UBL Urban and Built-up Land	32	0.2	296	1.6	+1.4
DCP Dryland Cropland and Pasture	245	1.3	1043	5.7	+4.4
ICP Irrigated Cropland and Pasture	2901	15.9	1729	9.5	-6.4
MCP Mixed Dryland/Irrigated Pasture	0	0.0	0	0.0	0
CGM Cropland/Grassland Mosaic	141	0.8	15	0.1	-0.7
CWM Cropland/Woodland Mosaic	161	0.9	4	0.0	-0.9
GRS Grassland	19	0.1	60	0.3	+0.2
SHR Shrubland	126	0.7	0	0.0	-0.7
SAV Savanna	1030	5.7	0	0.0	-5.7
DBF Deciduous Broadleaf Forest	0	0.0	389	2.1	+2.1
ENF Evergreen Needleleaf Forest	0	0.0	2205	12.1	+12.1
MFO Mixed Forest	695	3.8	324	1.8	-2.0
WBO Water Bodies	12875	70.6	11731	64.4	-6.2
HWE Herbaceous Wetland	0	0.0	404	2.2	+2.2
WWE Wooded Wetland	0	0.0	14	0.1	+0.1
BSV Barren or Sparsely Vegetated	0	0.0	11	0.1	+0.1
Total	18225	100%	18225	100%	-

Fig. 2. Distribution of land cover map (above) and comparison table (below) of USGS and KME on D03.

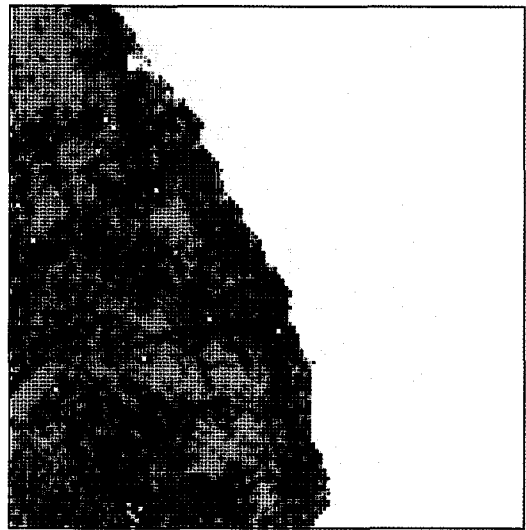
있더라도 산맥과 복잡한 해안선의 영향이 서로 다르게 나타나는 다양한 지형적 특성을 가지는 연안지역이 존재한다. 본 연구에서는 같은 연안지역이라도 다른 지형적 특성을 보이는 남서해안지역과 동해안지역의 토지피복도 개선에 따른 효과와 이에 따른 기상장의 영향을 분석하기 위하여 표 2와 같이 실험설계를 하였다. 환경부(KME) 토지피복도 자료는 기본 자료로 인도의 IRS-1C 위성영상, 미국의 Landsat

TM (Thematic Mapper) 위성영상, 수치지형도(1:5,000)를 근간으로 이용하고, 참조자료로 임상도, 생태·자연도, 지형도(1:25,000) 등을 사용한다. 위성의 해상도 차이로 영상융합시 문제가 발생하는 지역에 대해서는 참조자료인 수치지도, 지형도, 토지이용현황도 등을 이용하고 판독이 불가능한 지역에 대해서는 현지조사를 실시하여 구축되었다(환경부, 2007). 본 연구에서 사용한 중분류 토지피복도 자

D04 (USGS)



D04(KME)



Land-cover category	USGS		KME		Variation
	Pixels	Percent	Pixels	Percent	Percent
UBL Urban and Built-up Land	5	0.0	111	0.6	+0.6
DCP Dryland Cropland and Pasture	543	3.0	453	2.5	-0.5
ICP Irrigated Cropland and Pasture	800	4.4	269	1.5	-2.9
MCP Mixed Dryland/Irrigated Pasture	0	0.0	20	0.1	+0.1
CGM Cropland/Grassland Mosaic	11	0.1	0	0.0	-0.1
CWM Cropland/Woodland Mosaic	1753	9.6	42	0.2	-9.4
GRS Grassland	0	0.0	29	0.2	+0.2
SHR Shrubland	18	0.1	0	0.0	-0.1
SAV Savanna	3378	18.5	0	0.0	-18.5
DBF Deciduous Broadleaf Forest	479	2.6	2186	12.0	+9.4
ENF Evergreen Needleleaf Forest	64	0.4	3948	21.7	+21.3
MFO Mixed Forest	1389	7.6	1535	8.4	+0.8
WBO Water Bodies	9785	53.7	9617	52.8	-0.9
HWE Herbaceous Wetland	0	0.0	0	0.0	0
WWE Wooded Wetland	0	0.0	2	0.0	0
BSV Barren or Sparsely Vegetated	0	0.0	13	0.1	+0.1
Total	18225	100%	18225	100%	-

Fig. 3. Distribution of land cover map (above) and comparison table (below) of USGS and KME on D04.

Table 3. Classification pixels of KME according to USGS land cover types on D03.

KME	USGS																Total
	UBL	DCP	ICP	MCP	CGM	CWM	GRS	SHR	SAV	DBF	ENF	MFO	WBO	HWE	WWE	BSV	
UBL	29	27	146	0	14	4	2	7	29	0	0	2	36	0	0	0	296
DCP	1	37	615	0	35	20	2	22	82	0	0	18	209	0	0	0	1041
ICP	0	57	1010	0	32	17	0	23	229	0	0	23	339	0	0	0	1730
MCP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CGM	0	1	130	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
CWM	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
GRS	0	4	13	0	3	1	0	0	17	0	0	12	10	0	0	0	60
SHR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SAV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DBF	0	4	43	0	0	17	0	1	129	0	0	183	12	0	0	0	389
ENF	1	74	924	0	26	80	4	64	428	0	0	357	247	0	0	0	2205
MFO	1	8	63	0	2	18	0	4	114	0	0	98	17	0	0	0	325
WBO	0	22	51	0	18	4	7	4	2	0	0	2	11621	0	0	0	11731
HWE	0	10	10	0	8	0	4	1	0	0	0	0	371	0	0	0	404
WWE	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	14
BSV	0	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	11
Total	32	245	2901	0	141	161	19	126	1030	0	0	695	12875	0	0	0	18225

Table 4. Classification pixels of KME according to USGS land cover types on D04.

KME	USGS																Total
	UBL	DCP	ICP	MCP	CGM	CWM	GRS	SHR	SAV	DBF	ENF	MFO	WBO	HWE	WWE	BSV	
UBL	2	8	44	0	3	8	0	0	15	1	1	2	26	0	0	0	110
DCP	0	16	91	0	0	51	0	0	205	8	11	52	19	0	0	0	453
ICP	0	7	96	0	0	14	0	1	123	1	1	8	18	0	0	0	269
MCP	0	5	0	0	1	0	0	0	0	2	0	12	0	0	0	0	20
CGM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CWM	0	0	2	0	0	3	0	0	36	0	0	3	0	0	0	0	44
GRS	0	1	4	0	0	2	0	0	14	0	0	2	6	0	0	0	29
SHR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SAV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DBF	0	287	55	0	4	269	0	0	612	302	18	638	1	0	0	0	2186
ENF	3	132	408	0	3	984	0	16	1733	81	25	483	80	0	0	0	3948
MFO	0	86	92	0	0	419	0	1	639	82	8	186	21	0	0	0	1534
WBO	0	0	2	0	0	1	0	0	1	2	0	0	9611	0	0	0	9617
HWE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
WWE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2
BSV	0	1	6	0	0	2	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	13
Total	5	543	800	0	11	1753	0	18	3378	479	64	1389	9785	0	0	0	18225

료(<http://egis.me.go.kr/egis>)는 대분류 자료의 시가 화건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역 7개 분류항목을 중심으로 세분화되어진 것이다. 23개 항목(주거지역, 공업지역, 상업지역, 위락시설지역, 교통지역, 공공시설지역, 논, 밭, 하우스재배지, 과수원, 기타재배지, 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 자연초

지, 골프장, 기타초지, 내륙습지, 연안습지, 채광지역, 기타나지, 내륙수, 해양수)으로 구성되어져 있는 KME 토지피복도 자료를 WRF 모델에 적용하기 위하여 USGS 24개 분류코드로 재분류하여 사용하였다. EXP_U는 기존의 토지피복도인 900m 해상도 USGS 자료를 이용한 실험이고, EXP_K는 개선된 토

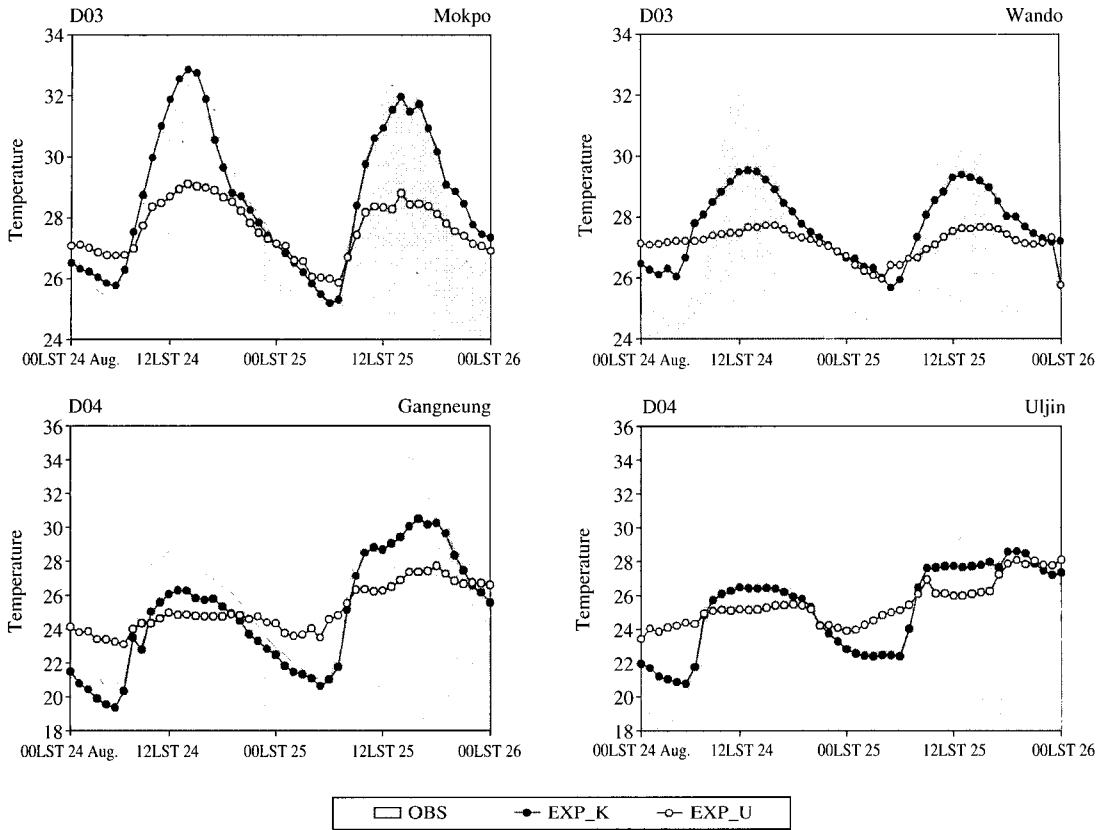


Fig. 4. Diurnal variation of observed and simulated temperature for Mokpo, Wando station in D03 and Gangneung, Uljin station in D04.

지피복도인 90 m 해상도 KME 자료를 사용한 실험이다. 연안지역의 지형특성으로 인한 해륙풍 순환, 내륙의 복잡한 지형형태 및 경사 등으로 인한 산곡풍 순환을 보다 정확히 모의하기 위하여 고해상도 지형자료인 90 m 해상도 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 자료는 동일하게 적용하였다.

3. 연안지역 특성에 따른 토지피복도 개선 효과

같은 연안지역이라도 다른 지형적 특성을 보이는 남서해안지역과 동해안지역의 KME 토지피복도 개선 효과를 분석하였다. 그림 2와 3은 남서해안과 동해안지역의 토지피복도 개선 전후 차이를 나타낸 그

림과 각 카테고리별로 재분류된 USGS와 KME의 격자수와 비율을 제시한 결과이다. 모델에 고려된 토지피복도 정보가 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 표 3과 4는 남서해안과 동해안지역에 대한 USGS와 KME 토지피복도의 유형별 분류 특성을 보다 상세하게 분석하기 위하여 KME 분류결과를 기준으로 USGS 분류 현황을 격자 개수의 변화로 나타내었다.

남서해안지역 토지피복도 분포를 보면, USGS 자료는 농작지(ICP/DCP)가 17.2%로 내륙의 상당한 부분을 차지하고, 사바나(SAV)와 혼합림(MFO) 지역이 각각 5.7%와 3.8%의 비율을 나타내고 있다. 도시/시가화(UBL) 지역의 비율은 0.2%로 광주를 포함한 일부 지역만이 도시지역으로 표현되고 있어, 1990년대 이후 도시지역 확장을 정확하게 나타내지 못하는 문제점이 있었다. 개선된 KME 자료는 0.2%의 도

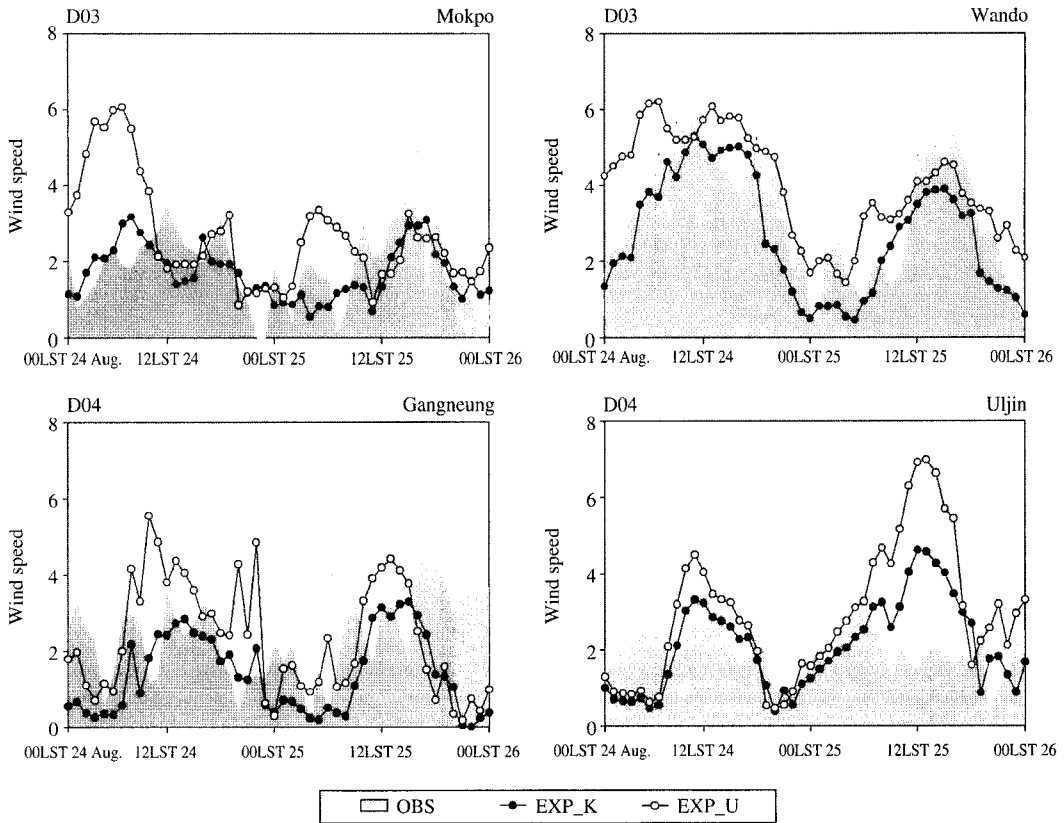


Fig. 5. Diurnal variation of observed and simulated wind speed for Mokpo, Wando station in D03 and Gangneung, Uljin station in D04.

시/시가화(UBL)지역이 1.6%로 확장되었고, 내륙에서 가장 많은 비율을 차지했던 농작지(ICP/DCP)는 표 3을 보면 침엽림(ENF)과 도시/시가화(UBL)지역으로 재분류되어 15.2%로 감소하였다. 또한 한반도에 존재하지 않는 열대우림인 사바나(SAV)는 지역적인 특성에 맞게 침엽림(ENF), 농작지(ICP/DCP), DBF(활엽림) 등으로 재분류되었다. USGS 자료에서 70.6%로 나타난 해양/내륙수(WBO)의 비율은 KME 자료를 적용하여 64.4%로 감소하였다. 복잡한 해안선과 섬들로 이루어진 남서해안지역의 경우 USGS 자료에서 정확한 해안선을 고려하지 못하여 실제로는 육지임에도 토지피복도가 해양으로 분류되는 문제점도 나타났다. 이는 기존 USGS 자료의 해상도가 낮기 때문에 실제 수치모델에서 평균화된 값을 나타냄으로써 복잡한 해안선과 작은 섬들을 고려하지 못

해 나타난 결과로 사료된다. KME를 적용한 결과에서 약 6% 가량 감소한 해양/내륙수(WBO)는 간척사업으로 인한 지표면상태 변화로 인한 연안습지(HWE), 내륙습지(WWE), 기타나지(BSV)를 비롯한 매립지로 바뀌었고, 일부는 농경지(ICP/DCP)와 도시/시가화(UBL)지역으로 변경되었다. 개선된 KME 자료는 남서해안지역의 정확한 해안선을 모델이 고려할 수 있도록 하였으며, 이로 인해 남서해안지역의 열환경 구조와 국지 바람장 모델링 개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 남서해안지역 토지피복도 개선 전후의 분포를 종합하면, 내륙과 해양을 포함하여 약 29.8%의 토지피복도 변화가 나타났다. 그 중에서 6.2% 감소한 해양의 비율은 남서해안지역의 해안선 분포를 상당히 변화시켰으며, 내륙에서 약 22.9% 비율이 다른 토지피복도로 재분류됨으로써 현

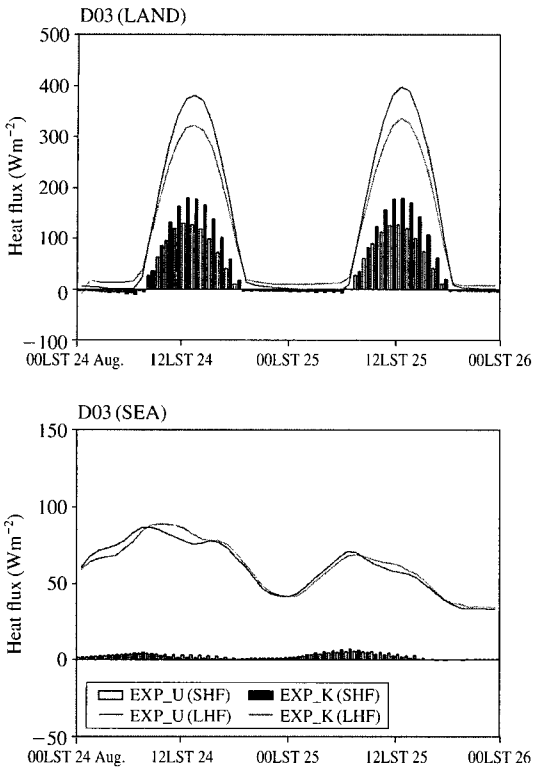


Fig. 6. Diurnal variation of mean sensible heat flux (SHF) and latent heat flux (LHF) over land and sea of EXP_U and EXP_K on D03.

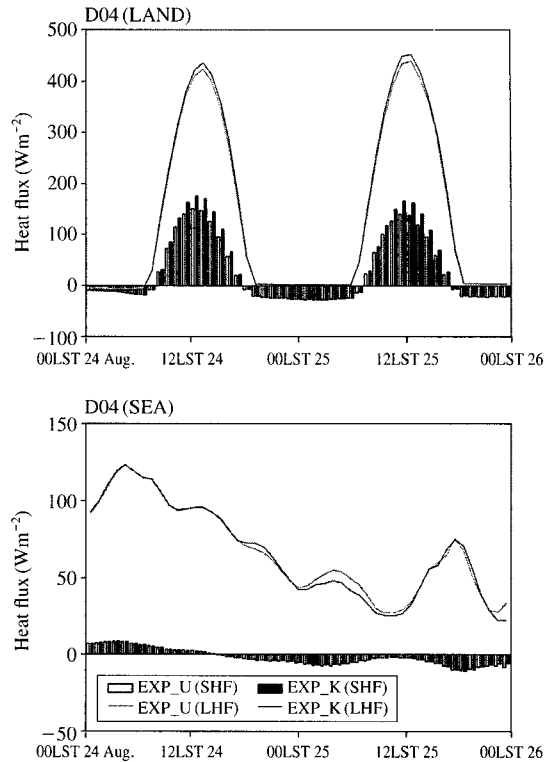


Fig. 7. Diurnal variation of mean sensible heat flux (SHF) and latent heat flux (LHF) over land and sea of EXP_U and EXP_K on D04.

실적인 남서해안지역의 토지피복도 분포 모의에 기여하였다.

동해안지역 토지피복도 분포를 보면, USGS 자료는 내륙의 1/3 이상인 18.5%를 열대우림인 사바나(SAV)로 분류하고 있고, 도시/시가화(UBL) 지역은 1.1 km 격자 5개 (6.05 km², 0.03%)만을 나타내고 있어 너무 작은 도시분포를 보여주고 있다. 개선된 KME 자료는 0.6%로 도시/시가화(UBL)지역이 확장되었고, 내륙에서 가장 많은 비율을 차지했던 사바나(SAV)는 표 4를 보면 침엽림(ENF), 혼합림(MFO), 활엽림(DBF), 농작지(ICP/DCP), 도시/시가화(UBL) 지역으로 재분류되었다. KME 자료에서는 사바나(SAV)의 재분류로 상대적으로 침엽림(ENF)과 활엽림(DBF)의 비율이 21.7%와 12.0%로 증가하였다. USGS 자료에서 53.7%였던 해양/내륙수(WBO)의 비율은 KME 자료에서 52.8%로 줄어들었고, 이는 남서

해안지역의 6.2% 감소 비율에 비해서는 상대적으로 작은 변화이다. 이러한 차이는 동해안지역이 단조로운 해안선을 이루고 있어서 해안선의 분포에 큰 변화가 없었기 때문으로 사료된다. 전체적인 토지피복도 분포의 변화는 동해안지역이 43.8%, 남서해안지역이 29.8%를 보여, 동해안지역이 상대적으로 더 많은 토지피복도가 재분류되고 변경된 것으로 나타났다. 동해안지역의 뚜렷한 토지피복도 특징은 기존의 USGS 자료에서 거의 나타나지 않았던 도시/시가화(UBL)지역이 강릉, 동해, 삼척, 울진 등을 포함하여 해안선을 따라 잘 발달하고 있다는 것이다. 이러한 해안선 부근 도시발달의 정확한 고려는 내륙과 해양의 열적인 분포를 정확하게 모의해 줌으로써 동해안지역의 정확한 기상장 모의에 기여할 것으로 기대된다. 동해안지역 토지피복도 개선 전후의 분포를 종합하면, 내륙과 해양을 포함하여 약 43.8%의 토지피복

도 변화가 나타났다. 특히, 전체 도메인에서 내륙이 차지하는 비율인 46.3%에서 약 42.9%의 비율이 다른 토지피복도로 재분류됨으로써 KME자료는 현실적인 동해안지역의 토지피복도 분포 모의에 기여하였다.

연안지역 특성에 따른 토지피복도 개선 효과를 보면 복잡한 해안선과 다양한 섬들이 분포해 있는 남서해안지역은 해상도가 낮은 USGS 자료가 수치모델에서 평준화된 값을 나타냄으로써 작은 섬들과 복잡한 해안선 분포를 정확하게 고려하지 못하여 실제로는 육지임에도 해양으로 분류되는 큰 문제점이 있었다. 또한 USGS 자료는 과거자료로서 남서해안지역의 간척사업에 의한 해안선 변화, 내륙 토지 확장 등을 잘 나타내지 못하고 있는 것으로 나타났다. KME 자료는 이러한 문제점을 보완하여 남서해안지역의 정확한 해안선을 모델이 고려할 수 있도록 하였다. 동해안지역은 강원도지역에 넓게 분포하고 있는 활엽림과 침엽림을 USGS 자료에서 대부분 열대우림인 사바나로 분류하고 있었고, 해안선을 따라 발달된 도시 분포를 전혀 나타내지 못하고 있었다. 두 지역에서 공통적으로 나타난 문제점은 한반도 도시화에 따른 도시지역의 확장을 잘 고려하지 못하고 있다는 것이다. 개선된 토지피복도는 토지피복도에 대한 정확한 반사도, 수분량, 거칠기 길이, 지표면 열적 관성 등이 정확하게 고려되어 지표면 플럭스 변화와 대기경계층에서의 열과 수분의 수평/연직 이류의 변화를 야기할 것으로 생각된다. 이러한 지표면의 열환경 변화는 대기경계층내 기온과 바람장 분포에도 상당한 영향을 미치게 되어 연안지역 모델링 결과를 보다 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다. 다음 장에서는 남서해안과 동해안지역의 토지피복도 개선 효과가 기상장 변화와 분포 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

4. 상세 토지피복도 적용에 따른 기상장 변화와 분포 특성

모델 결과의 신뢰성 있는 분석을 위해서는 WRF 모델링 결과에 대한 검증이 필수적이다. WRF 모델의 결과를 검증하기 위하여 남서해안지역과 동해안지역에 위치한 기상청 관측 기상대 자료를 이용하였다. 그림 4와 5는 spin-up 시간을 제외한 2007년 8월

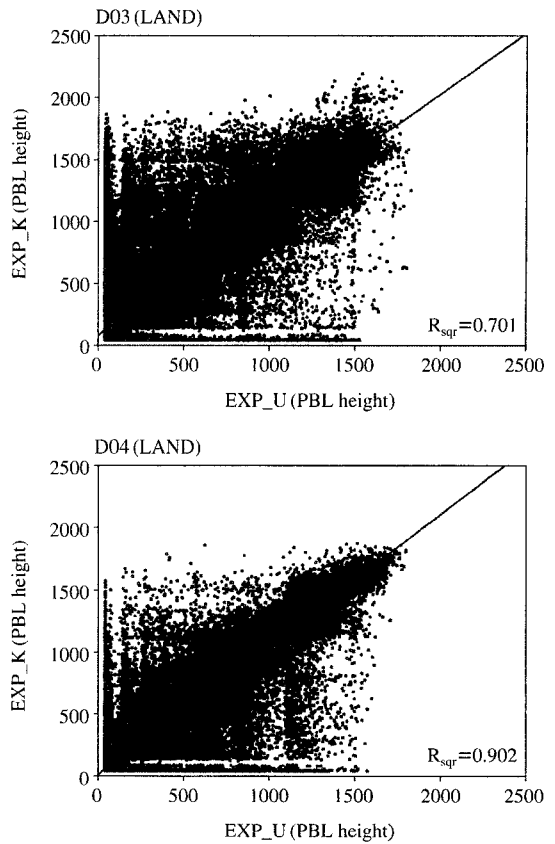


Fig. 8. Scatter plot and correlation coefficient of PBL height over land of EXP_K in relation to EXP_U on D03 and D04, respectively.

24일 0000 LST부터 26일 0000 LST까지 남서해안지역의 목포와 완도, 동해안지역의 강릉과 울진에서 기온과 풍속의 관측값과 모델값(EXP_U/EXP_K)을 비교한 것이다. 남서해안지역에서는 주간의 기온 상승을 EXP_K가 EXP_U보다 잘 모의하고 있었고, 목포 관측소의 경우 8월 24일 1500 LST에 최대 4°C 가량의 기온차를 보이며 관측값과 근사하였다. 동해안지역에서는 야간의 최저기온과 일변화를 보다 정확하게 모의하는 것으로 나타났다. 풍속의 검증에서는 EXP_K와 EXP_U 모두 기온보다는 관측값과 다소 차이를 보였다. 이는 토지피복도 개선 효과가 직접적으로 영향을 미치는 기온과는 달리 바람은 주변의 복잡한 지형 효과가 복합적으로 작용되기 때문으로 사료된다. 남서해안과 동해안지역 모두 EXP_K의 결과

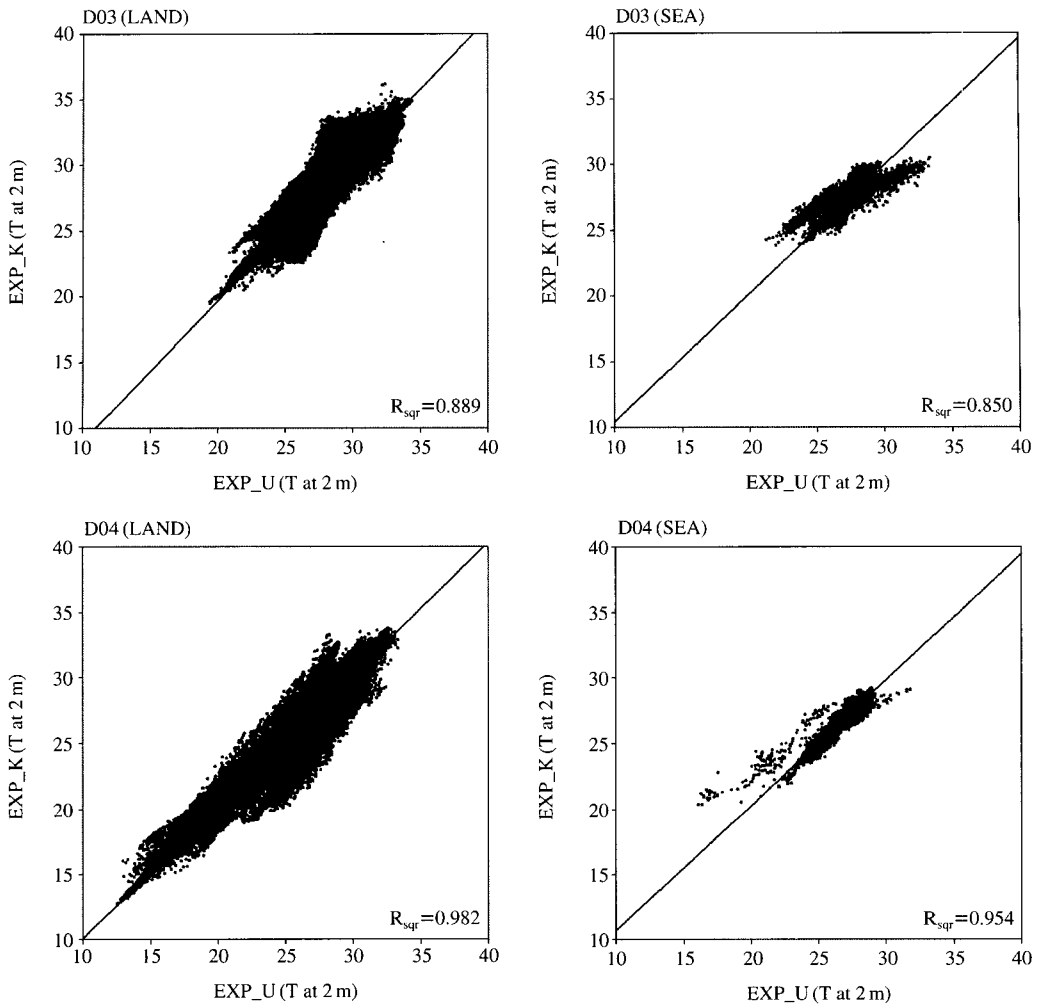


Fig. 9. Scatter plot and correlation coefficient of temperature at 2 m over land and sea of EXP_K in relation to EXP_U on D03 and D04, respectively.

가 관측값과 유사한 시계열 변화를 나타내고 있고, 강하게 모의된 풍속을 다소 감소시키는 것을 보였다. 전반적으로 다소의 단기적 오차가 존재하나 토지피복도를 개선한 EXP_K의 결과가 관측값의 시, 공간적 변화 경향을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

신뢰성 있는 모델 결과를 토대로 KME 상세 토지 피복도 적용에 따른 효과가 연안지역 특성에 따라 기상장 분포에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 남서해안과 동해안지역을 내륙과 해양으로 구분하여, 지표면 플럭스, 대기경계층 높이, 기온과 바람장에 나타난 결과를 분석하였다. 그림 6과 7은 남서해안지역

과 동해안지역의 내륙과 해양의 느낌열플럭스(SHF, Sensible Heat Flux)와 숨은열플럭스(LHF, Latent Heat Flux) 분포이며, 각 시간대별 내륙과 해양의 격자별 SHF와 LHF를 평균하여 시계열로 나타낸 것이다. SHF는 지표면과 대기경계층 사이에서 이루어지는 직접적인 열플럭스 과정으로 온도 차이에 기인하며, LHF는 지표면에서 이루어지는 증발, 증발산 또는 응결의 결과로 나타난다. 주간에는 지표면이 복사에너지를 흡수하기 때문에 SHF가 방출되어 내륙에는 양의 값의 플럭스를 보이고, 야간의 지표면은 복사방출에 의해 에너지를 잃어 음의 값의 플럭스를 나타

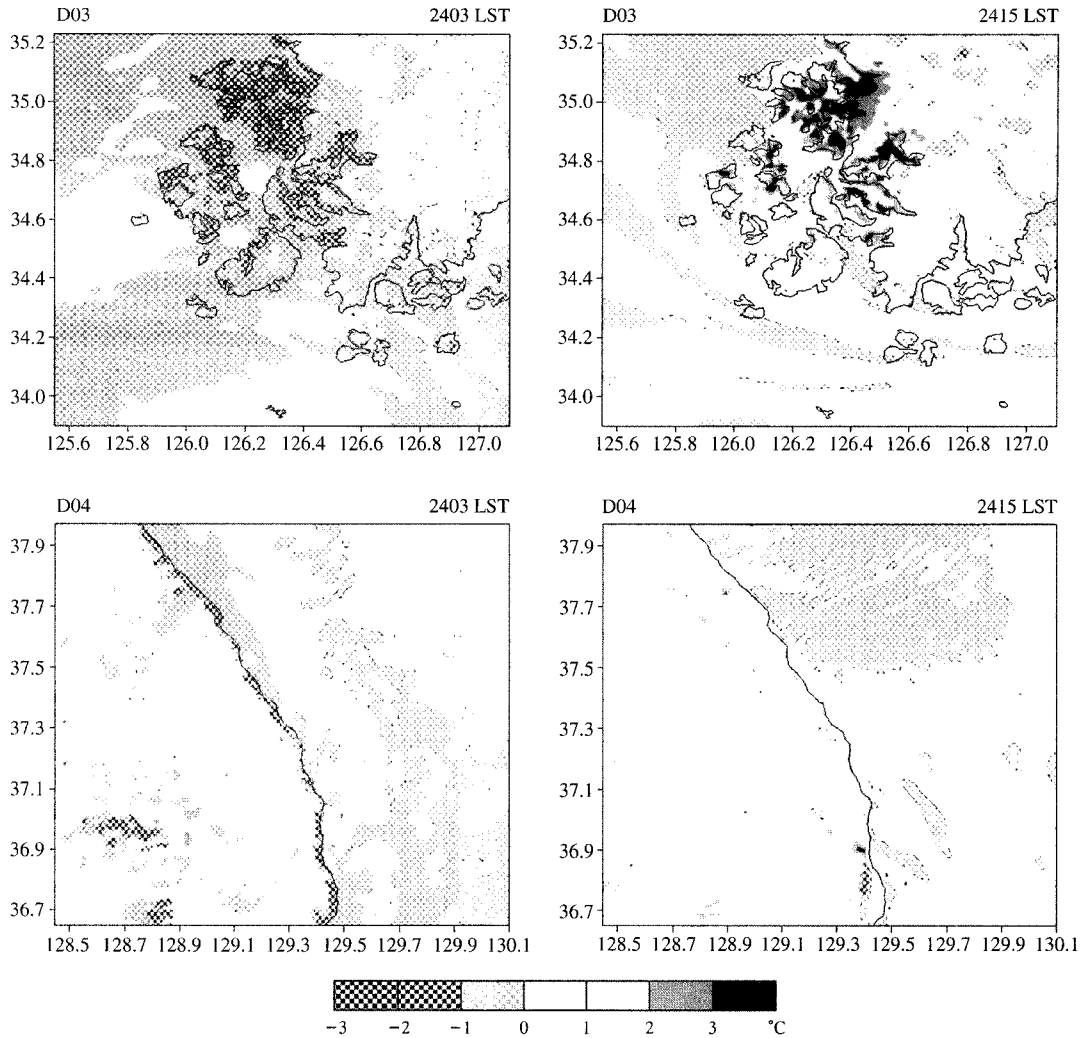


Fig. 10. The horizontal temperature fields of the difference between EXP_U and EXP_K at 0300 LST and 1500 LST 24 August 2007 on D03 and D04.

낸다. 간척사업에 의한 해안선 변화, 내륙 토지와 도시 확장 등의 토지피복도 개선 효과를 보인 남서해안지역은 EXP_K 실험에서 주간에 SHF와 LHF의 뚜렷한 증가를 보였다. 동해안지역은 EXP_K 실험이 주간에 SHF가 약간 증가하였으나 남서해안지역보다 토지피복도 변화에 따른 플럭스 변화량은 적었고, LHF는 거의 유사하였다. 해양에서의 플럭스는 내륙과는 큰 차이를 보이며, SHF 역할은 미비하고 수면 밑의 혼합층의 두께가 크기 때문에 복사 가열에 의해 쉽게 반응하지 않는다. 이러한 이유로 해양에서의 플

럭스 변화는 전반적으로 내륙보다 작게 나타났으며, LHF가 SHF를 능가하여 보웬비는 1보다 훨씬 작은 것을 알 수 있다.

지표면 플럭스가 변화함에 따라 대기경계층 높이도 변하게 된다. 그림 8은 남서해안과 동해안지역의 토지피복도 개선에 따른 내륙 대기경계층 높이 변화의 상관도를 분석하였다. 남서해안지역은 0.701의 상관계수를 보였고, 동해안지역은 0.902의 상관계수를 나타내었다. 상관도가 낮다는 것은 EXP_U에 비해 EXP_K의 변화가 컸다는 것을 의미하고, 이는 토지

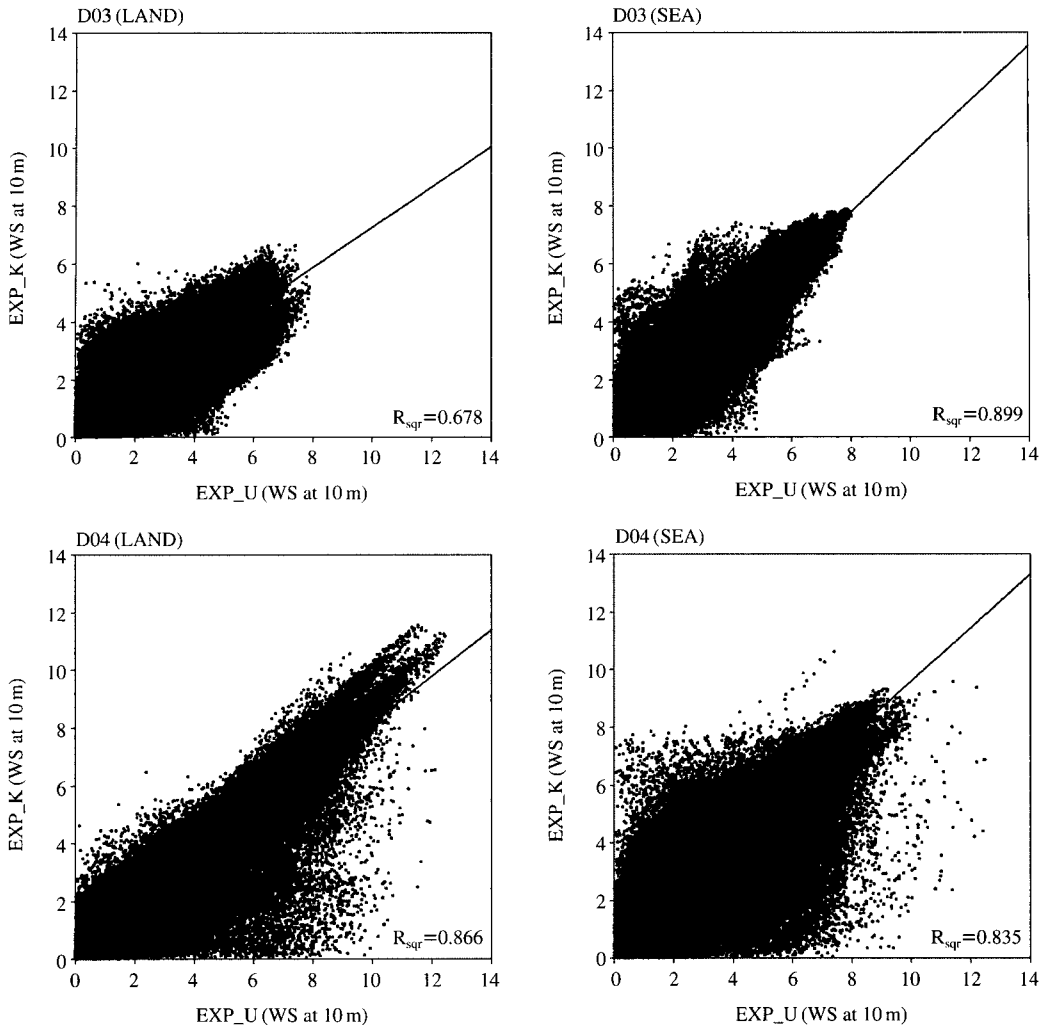


Fig. 11. Scatter plot and correlation coefficient of wind speed at 10 m over land and sea of EXP_K in relation to EXP_U on D03 and D04, respectively.

피복도 개선에 의해 대기경계층 높이의 변화가 뚜렷했음을 나타낸다. KME 토지피복도는 두 지역 모두 대기경계층 고도를 향상시키는 결과를 보였고, 주간에 SHF의 변화량이 상대적으로 컸던 남서해안지역이 동해안지역보다 대기경계층이 더 높게 발달한 것을 알 수 있다.

개선된 토지피복도가 남서해안과 동해안지역의 기온장과 바람장에 미치는 영향을 내륙과 해양으로 나누어 분석하였다. 그림 9는 남서해안과 동해안지역 내륙과 해양에서의 기온 상관도이고, 그림 10은 2007

년 8월 24일 0300 LST와 1500 LST에 EXP_U와 EXP_K의 기온 difference map을 나타낸다. 분석시간인 0300 LST와 1500 LST는 일반적으로 하루 중에서 복사냉각과 복사가열이 뚜렷하여 연안지역의 국지기상인 육풍과 해풍이 잘 발달하는 시간이다. 남서해안지역은 내륙에서의 기온 상관도는 0.889이고 해양에서는 0.850이며, 동해안지역은 내륙에서 기온 상관도는 0.982이고 해양에서는 0.954이다. 상관도가 낮게 나타난다는 것은 EXP_U와 EXP_K의 차이가 크다는 것이고, 이는 토지피복도 개선에 의한 효과가

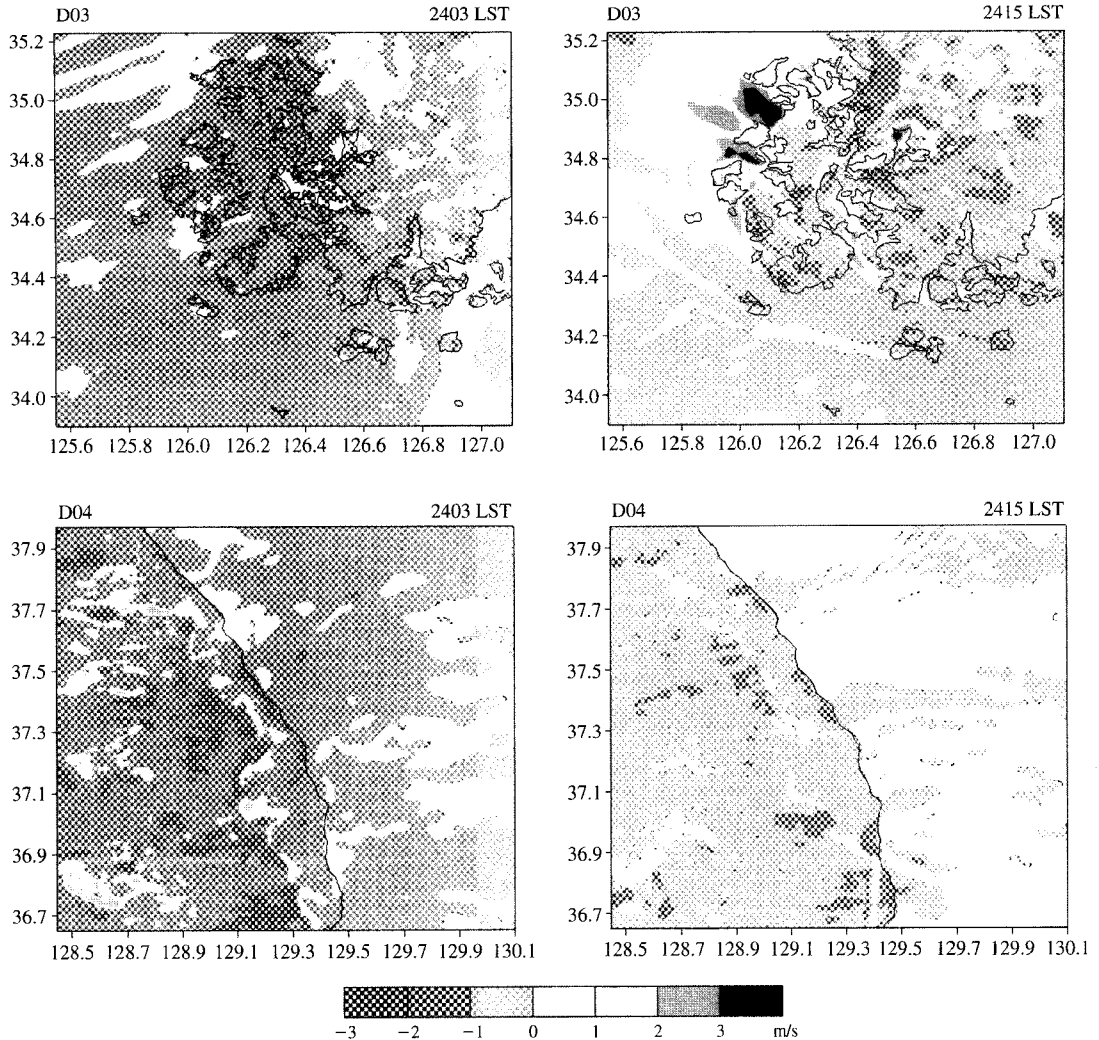


Fig. 12. The horizontal wind speed fields of the difference between EXP_U and EXP_K at 0300 LST and 1500 LST 24 August 2007 on D03 and D04.

뚜렷하게 나타났다는 것을 의미한다. 복잡한 해안선과 지형 특성을 보이는 남서해안지역이 토지피복도 개선 효과가 크게 나타났다. 남서해안지역은 8월 24일 0300 LST에 목포를 중심으로 작은 섬들이 분포하고 있는 무안 앞바다 주변에서 해안선을 따라 기온의 변화가 크게 나타났다. EXP_U에서 해양으로 표현되었던 해안선 경계지역이 EXP_K에서 내륙으로 표현되면서 야간의 기온이 낮게 모의된 것으로 추정되며, 이는 영산강 일대와 근처 작은 섬들 주변으로 토지피복도 변화가 심했던 지역에서 뚜렷하게 확인

할 수 있었다. 간척사업에 의한 매립지와 작은 섬들이 분포해 있는 지역에서 최대 1~2°C 기온을 낮게 모의하는 특성을 보였다. 8월 24일 1500 LST에 토지피복도 변화가 가장 심했던 영산강 하류와 무안 앞바다 주변에서 EXP_U와 EXP_K의 기온차이가 크게 나타났다. 최대 3°C 정도 기온을 높게 모의하였고, 인근 해양에서는 기온이 감소하였다. 이것은 EXP_U에서 해양으로 표현되었던 해안선 경계지역이 EXP_K에서 내륙으로 표현되면서 주간 기온이 해안선을 따라 더욱 높게 모의된 것으로 추정된다. 동해안지역

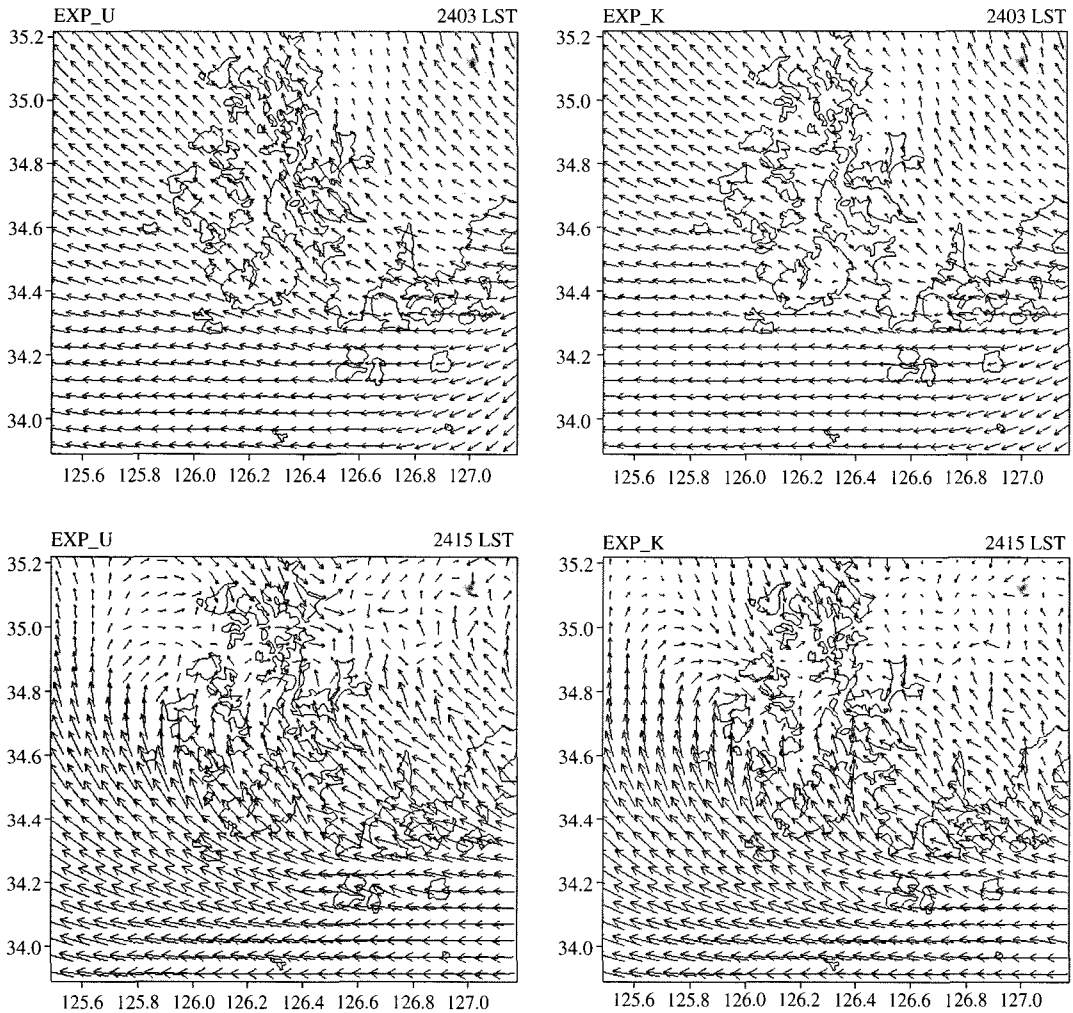


Fig. 13. The horizontal wind vectors for EXP_U and EXP_K at 0300 LST and 1500 LST 24 August 2007 on D03.

은 8월 24일 0300 LST에 EXP_U와 EXP_K가 전체적으로 비슷한 분포를 보였으나, 해안선부근에는 1°C 정도의 기온 감소가 나타났다. 이는 개선된 KME 자료가 동해안지역의 도심지와 산악지대를 보다 현실적으로 모의했기 때문으로 사료된다. 8월 24일 1500 LST에도 전체적으로 야간과 비슷한 분포를 보이고 있다. 뚜렷한 특징은 EXP_K에서 강릉지역의 기온이 1°C 가량 높게 나타났고, 동해와 울진지역은 2~3°C 가량 높게 나타났다는 것이다. 이러한 현상은 USGS 자료가 동해안지역 해안선을 따라 존재하는 도심지들을 초원과 목초지로 분류하고 있어 나타난 결과이

며, KME 자료에서 해안선을 따라 발달해 있는 강릉, 동해, 울진 등의 도시분포가 정확하게 고려되면서 기온의 뚜렷한 상승이 나타난 것으로 생각된다.

그림 11은 남서해안과 동해안지역의 내륙과 해양에서 풍속의 상관도이고, 그림 12는 2007년 8월 24일 0300 LST와 1500 LST에 EXP_U와 EXP_K의 풍속의 difference map이다. 그림 13과 14는 남서해안과 동해안지역에 대한 8월 24일 0300 LST와 1500 LST의 수평바람장 분포를 나타낸다. 남서해안지역 내륙의 풍속 상관도는 0.678이고 해양에서는 0.899이며, 동해안에서는 내륙의 풍속 상관도는 0.866이고

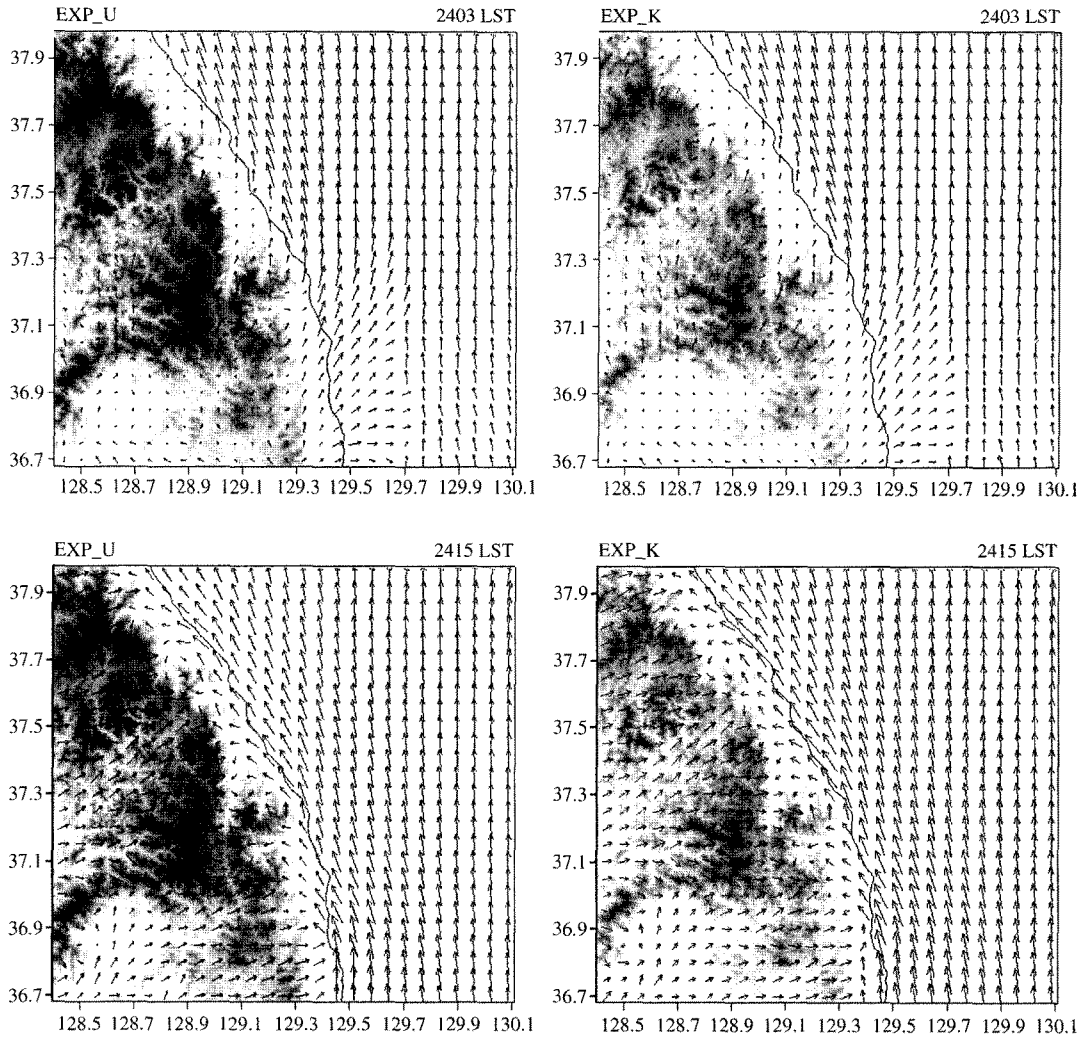


Fig. 14. The horizontal wind vectors for EXP_U and EXP_K at 0300 LST and 1500 LST 24 August 2007 on D04.

해양에서는 0.835이다. 토지피복도 개선의 영향은 내륙에서 남서해안지역의 변화가 크게 나타났고, 해양에서는 동해안의 변화가 큰 것을 보였다. 남서해안지역에서는 8월 24일 0300 LST에 동풍계열의 풍계가 지배적으로 나타나고 있는 가운데 해안선 부근과 섬 사이로 바람이 통과할 때 EXP_U와 EXP_K의 변화가 크게 나타났고, 특히 토지피복도 변화가 컸던 목포 앞바다와 영산강 하류 일대에서 풍속이 약해지면서 $1\sim 3\text{ ms}^{-1}$ 의 풍속 감소가 뚜렷하였다. 해양에서의 풍속 또한 약간 감소하는 경향을 보였다. 8월 24일

1500 LST에 남쪽 해양을 중심으로 동풍 계열의 풍계가 지배적으로 나타나고 있으며 해안선을 따라 내륙으로 불어 들어가는 바람이 섬 사이를 통과할 때 풍속 감소가 뚜렷하였다. EXP_K에서 지표플럭스의 변화로 곽풍이 잘 발달되어 완도 주변을 중심으로 바람이 수렴하는 모습을 볼 수 있으며, 이러한 바람이 해풍과 결합하여 5 ms^{-1} 이상의 강한 풍속을 보이고 있다. 목포앞바다와 영산강 하류 일대에서 토지피복도 개선에 의한 주간 지표플럭스의 증가로 내륙과 해양의 기온차가 커지면서 해풍이 강하게 발달된 모습

이 선명하게 나타났으나, 그 외 지역은 풍속의 변화가 작았다. 동해안지역에서는 8월 24일 0300 LST에 대체적으로 해양에서는 강한 남풍계열의 바람이 지배적으로 나타났지만, 내륙지역을 중심으로 심한 풍향의 변화를 보였고 지형적 복잡성에 따른 풍속의 변화도 남서해안지역보다 선명하게 나타나고 있다. EXP_U에서 태백산맥을 타고 내려오던 산풍이 해안선 부근의 해상풍과 만나면서 풍속이 감소하는 경향을 보였으나, EXP_K에서는 야간시간 전반적으로 약한 풍속 분포를 보이고 있다. 특히, 전 영역에서 풍속이 약 1 ms^{-1} 정도 낮게 모의되었으며, 내륙지역에서 풍속의 감소가 더 뚜렷하였다. 8월 24일 1500 LST에는 해양에서 대체적으로 강한 남풍계열의 바람이 지배적으로 나타났지만, 해안선 부근을 중심으로 풍향 변화가 나타나고 있으며 지형적 복잡성에 따른 풍속의 변화가 선명하게 나타났다. 강릉과 동해를 비롯한 해안가 지역의 풍향 변화는 크지 않았으나, 뚜렷한 풍속 변화가 존재함을 확인할 수 있었다. 내륙의 풍속은 $1 \sim 2 \text{ ms}^{-1}$ 정도 감소하였으며, 이는 내륙지역 지표플럭스 변화가 바람장 변화에 영향을 미친 것으로 사료된다.

개선된 토지피복도 영향은 복잡한 해안선과 섬들로 이루어진 남서해안지역이 동해안지역보다 크게 나타났다. KME 자료는 대상지역의 해안선 형태와 지표면 상태를 현실적으로 고려하여 내륙과 해양의 기온 변화를 뚜렷하게 모의하는 특징을 보였다. 남서해안지역은 토지피복도 변화가 해안선과 인근 해양의 기온분포에 넓게 영향을 미쳤으며, 동해안지역은 해안선을 따라 좁은 지역에서 기온의 변화가 뚜렷하였다. 토지피복도 변화에 의한 지표플럭스와 기온분포의 변화는 연안지역 바람장 변화에 크게 기여하는 것을 보였다. 야간에는 남서해안지역에 섬들 사이의 풍속 감소가 뚜렷하였고, 동해안지역은 내륙에서의 풍속 감소와 동해 인근 해양에서의 뚜렷한 풍향 변화를 야기하였다. 주간에는 남서해안지역의 목포 앞바다와 영산강 하류 일대 강한 해풍모의를 제외하고는 두 지역 모두 내륙의 풍속 감소를 보였다. 본 연구에서 수행한 토지피복도 개선은 복잡한 해안선과 다양한 섬들의 효과로 바람장이 형성되는 남서해안지역과 높은 산맥과 해양의 작용이 바람장 분포에 중요한 역할을 하는 동해안지역에서 모두 개선된 바람장 분포를 보임을 확인할 수 있었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 한반도에 위치해 있는 연안지역이라도 다른 지형적 특성을 보이는 남서해안지역과 동해안지역을 대상으로 연안지역 특성에 따른 상세 토지피복도 개선 효과를 분석하고, 토지피복도 개선 효과가 두 연안지역의 기상장 변화와 분포 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 사용된 상세 토지피복도 자료는 환경부에서 지리정보시스템으로 구축한 23개 항목의 중분류 토지피복도 자료이며, WRF모델에 적용하기 위하여 USGS 24개 코드로 재분류하여 사용하였다.

남서해안지역에서 USGS 자료는 간척사업에 의한 해안선 변화, 내륙 토지 확장 등을 잘 나타내지 못하고 있는 것으로 나타났으나, KME 자료는 이러한 문제점을 보완하여 남서해안지역의 정확한 해안선을 모델이 고려할 수 있도록 하였다. 동해안지역은 강원도지역에 넓게 분포하고 있는 활엽림과 침엽림을 USGS 자료에서 대부분 열대우림인 사바나로 분류하였고, 해안선을 따라 발달된 도시분포를 전혀 나타내지 못하고 있었다. 개선된 KME 자료는 이러한 문제점을 보완하여 동해안의 토지피복도 분포를 현실적으로 모의하였다. 전반적으로 USGS 자료는 두 연안지역에서 도메인 영역의 상당한 비율이 현실의 토지피복도 상태와는 많은 차이점을 보임을 알 수 있었고, 특히 한반도 도시화에 따른 도시지역의 확장을 잘 고려하지 못하는 것을 보였다.

개선된 토지피복도의 영향은 복잡한 해안선과 섬들로 이루어진 남서해안지역이 동해안지역보다 크게 나타났다. 주간에 플럭스 변화량이 상대적으로 컸던 남서해안지역이 동해안지역보다 대기경계층이 더 높게 발달하였고, 토지피복도 변화에 따른 영향도 크게 나타났다. 또한, KME 자료는 대상지역의 해안선 형태와 지표면 상태를 현실적으로 고려하여 내륙과 해양의 기온 변화를 뚜렷하게 모의하는 특징을 보였고, 기온의 상관도 분석에서 내륙의 토지피복도 개선이 해양에도 상당한 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 남서해안지역은 토지피복도 변화가 내륙과 인근 해양의 기온분포에 넓게 영향을 미쳤으며, 동해안지역은 해안선을 따라 좁은 지역에서 기온 변화가 나타났다. 이러한 지표플럭스와 기온분포의 변화는 연안지

역 바람장 변화에 크게 기여하였다. 야간에 남서해안 지역은 섬들 사이의 풍속 감소가 뚜렷하였고, 동해안 지역은 내륙에서의 풍속 감소와 동해지역 인근 해양에서의 뚜렷한 풍향 변화를 야기하였다. 주간에는 남서해안과 동해안지역은 전반적으로 내륙의 풍속 감소를 보였으나, 남서해안지역의 목포 앞바다와 영산강 하류 일대에서는 강한 해풍을 모의하였다. 본 연구에서 수행한 토지피복도 개선은 복잡한 해안선과 다양한 섬들의 효과로 바람장이 형성되는 남서해안지역과 높은 산맥과 해양의 작용이 바람장 분포에 중요한 역할을 하는 동해안지역에서 모두 개선된 바람장 분포를 보임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-313-C00779).

참 고 문 헌

강전호, 서명석, 곽종흠(2007) 아시아 지역 지면피복자료 비교 연구: UGS, IGBP, 그리고 UMD, Atmosphere, 17(2), 159-169.

김유근, 정주희, 배주현, 송상근, 서장원(2005) 한반도 남동해안 해상풍 모의에 적합한 경계층 폴리방안 연구, 한국환경과학회지, 14(11), 1015-1026.

문윤섭, 구윤서(2006) 수도권지역에서 수치 토지피복지도 작성을 통한 대기환경부문 활용사례 연구-MM5 내 기온 및 바람장의 민감도 분석과 식생분포에 기인한 VOC 배출량 및 CO₂ 플럭스의 실시간 산정을 중심으로-, 한국대기환경학회지, 22(5), 661-678.

배주현, 김유근, 오인보, 정주희, 권지혜, 서장원(2005) 복잡 해안지역 해상풍 모의의 정확도 개선 - I: 현업모델의 평가, 한국환경과학회지, 14(7), 657-667.

원경미, 이화운, 유정아, 홍현수, 황만식, 천광수, 최광수, 이문순(2008) RAMS의 실시간 기상장 예측 향상을 위한 최신 토지피복도 자료의 적용 가능성 평가, 한국대기환경학회지, 24(1), 1-15.

이화운, 김유근, 정우식(2000) 복잡 연안지역에서 해풍시 지형의 영향에 대한 수치모의, 한국기상학회지, 36, 561-572.

환경부(2007) 환경지리정보, <http://egis.me.go.kr/egis>.

Cheng, F.-Y. and D.W. Byun(2008) Application of high resolution land use and land cover data for atmospheric modeling in the Houston-Galveston metropolitan area. Part I: Meteorological simulation results, Atmos. Environ., 42, 7795-7811.

Lam, J.S.L., A.K.H. Lau, and J.C.H. Fung(2006) Application of reclassified land-use categories for high resolution mesoscale atmospheric modelling, Boundary-Layer Meteorology, 119, 263-288.

Loveland, T.R., B.C. Reed, J.F. Brown, D.O. Ohlen, Z. Zhu, L. Yang, and J.W. Merchant(2000) Development of a global land cover characteristics data base and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data, Int. J. Remote Sensing, 21, 1251-1277.

Pielke, R.A. (1984) Mesoscale Meteorologica Modeling. Academic Press Inc., 612.

Skamarock, W.C., J. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, and J.G. Powers(2005) A description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.

Suh, M.-S. and D.-K. Lee(2004) Impacts of land use/cover changes on surface climate over east Asia for extreme climate case using RegCM2, J. Geophys. Res., 109, D02108., doi:10.1029/2003JD003681.