

도시형 중규모기상모델을 이용한 연안도시 해풍전선 발달 분석

Analysis of Sea-breeze Frontogenesis over the Coastal Urban Area Using Urbanized MM5

황 미 경 · 오 인 보¹⁾ · 김 유 근*

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾울산대학교 환경보건센터
(2011년 1월 28일 접수, 2011년 6월 2일 수정, 2011년 7월 6일 채택)

Mi-Kyoung Hwang, In-Bo Oh¹⁾ and Yoo-Keun Kim*
Division of Earth Environmental System, Pusan National University
¹⁾*Environmental Health Center, University of Ulsan*

(Received 28 January 2011, revised 2 June 2011, accepted 6 July 2011)

Abstract

To analyze the physical processes of sea-breeze development over a coastal urban area, numerical simulation for sea-breeze (SB) and its frontogenesis was examined based on urbanized MM5 (uMM5) with urban canopy parameterization. On 6 August 2006, SB and its front were well developed in Busan under a weak offshore flow. As a result of wind vector, ZVB (Zero Velocity Boundary), potential temperature obtained the uMM5, at 0900 LST, SB advanced below 200 m height in the coastal areas and the internal boundary grew with the urban coastal region. At noon, the height of the SB head with updraft was approximately one and a half times (~600 m) higher than its depth in central urban. Applying the frontogenesis function, the SB structure for frontogenesis and frontolysis were complicated spatially; the dynamic effects of wind (i.e. convergence and tilting term) could play an important role in the growth of SB, especially the convergence effect.

Key words : Sea-breeze, Sea-breeze front, Frontogenesis function, Urbanized MM5, Meteorological modeling, Coastal urban area

1. 서 론

해풍(Sea-breeze)은 육지와 해양의 비열차로 유도된 기압경도에 의해 발생하는 대표적인 중규모 기상

현상이다(Simpson, 1994). 해풍의 형태와 지속정도는 연안지역의 기상조건과 대기질 환경변화에 중요한 역할을 하게 되는데 이는 인간생활에 긍정적, 때로는 부정적 영향을 주게 된다. 특히 해풍은 내륙의 열환경 변화, 급격한 악기상의 발생, 연안무 생성 등의 기상학적 변화를 유발시키고 동시에 연안의 내부대기 경계층을 형성시키거나 오염물질의 축적 및 이류/확산에 직접적으로 영향을 미친다(Simpson, 1994; Hsu,

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

1988; Barbato, 1975). 우리나라 대표적인 연안도시인 부산의 경우, 해풍침투에 따라 연안 선박에서 배출된 오염물질(NO_x 및 SO_2 배출량의 각각 12.6, 34.2%)이 도시로 수송되므로 대기오염과 해풍 발달은 밀접한 관련을 가진다(Song *et al.*, 2010). 이에 해륙풍의 구조와 순환의 이해는 인간의 주거 및 사회경제활동이 집중되어 있는 연안도시지역의 대기환경을 평가하고 예측하는데 매우 중요하다.

연안지점에서 해풍 유입 시, 대기정체, 바람의 순전(veering), 기온 감소, 습도 증가가 나타날 수 있음이 여러 관측을 통해 널리 알려져 있다(Atkinson, 1981). 해풍 구조는 크게 하층의 해풍 유입부와 상층의 반류로 이루어지며, 해풍의 두께 및 수평적인 범위는 관측 지역에 따라 다양하다. 해풍은 연직적으로 0.1~1 km의 두께를 가지며, 반류는 해풍의 상부에서 해풍의 약 50%의 풍속으로 2 km 이하의 두께를 가지고 존재함이 여러 관측을 통해 제시되었다(Atkinson, 1981; Barbato, 1975; Simpson, 1969). Tijn *et al.* (1999)은 중관장이 약한 날에 관측을 통해 1 km 이상까지 뚜렷한 해풍 유입 및 그 상층에서 해풍반류의 존재를 확인하고 해풍반류의 중요성을 제시한 바 있다. 해풍은 중관장의 영향에 따라 발달 및 침투정도가 크게 달라질 수 있다(Helmis *et al.*, 1995; Arritt, 1993; Simpson *et al.*, 1977). 특히 중관적으로 하안풍(offshore wind)이 존재할 경우, 해풍의 내륙침투는 제한되나 해안역에서 뚜렷하게 발달한 해풍전선과 함께 강한 해풍을 발생시킬 수 있다(Reible *et al.*, 1993).

국내에서는 수치모델링 연구를 통한 기상장 진단에 대한 연구로 최근 Lee *et al.* (2009)은 MODIS 위성 자료 및 연직 기상자료의 자료동화를 통해 기상장 정확도 향상을 시키고자 하였으며, Jeong *et al.* (2007)은 중규모기상모델 MM5 (PSU/NCAR mesoscale model), RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), WRF (Weather Research and Forecasting Model)를 이용하여 바람장과 온도장의 모사특성을 각각 분석한 바 있다. 하지만 특히 복잡한 구조물을 가지고 있는 대도시의 경우 건물구조가 도시기상에 깊이 관여하기 때문에(Emmanuel and Johansson, 2006; Nichol, 1996), 건물효과가 정확히 고려된 해풍구조를 파악하는 것은 매우 중요하다. 건물이 대기유동장에 미치는 영향은 미세규모에서 다양하게 수행되었고, 건물모양, 높이, 건물간격 등에 따른 바람장 변화를 중심으로 연

구되었다. 특히 1980년대 이후 고층건물에 대한 역학적 중요성이 인식되면서 고층건물군에 의한 국지바람장 변화가 다수 연구되었다(Zhang *et al.*, 1994; Taniike, 1992; Bailey and Kwok, 1985). 한편 Yang and Li (2009)는 정체조건에서 도시의 대기환기능력은 국지순환계보다 오히려 도시건물군에 의한 열환경에 의해 결정되어질 수 있음을 보여 건물군에 의한 열적 변화요인 또한 중요함을 제시하였다. 이에 건물의 역학적·열적 효과가 현실적으로 고려된 수치모델링 연구가 요구되며, 이를 통해 해풍 진단이 수행되어야 할 것이다.

본 연구는 도시캐노피층 내의 다양한 도시효과를 고려한 도시형 중규모모델(urbanized MM5; 이후 uMM5)을 적용하여 연안도시에서 형성되는 해풍과 해풍전선을 수치모의하였고, 전선발달함수(Kraus, 1992)를 이용하여 해풍전선의 발생 및 소멸과 이를 결정짓는 영향인자를 상세히 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 수치모델링

본 연구에서는 부산지역을 대상으로 해풍 수치모델링을 위해 PSU/NCAR MM5의 도시형 버전인 uMM5를 이용하였다. 이는 MM5 version 3.5에 도시캐노피모수화(Urban Canopy Parameterization, UCP)가 추가되어 도시구조물들에 의한 역학적·열역학적 효과가 추가된 모델이다. 역학적 효과는 운동방정식과 TKE(Turbulent Kinetic Energy)방정식의 개선을 통해 도시구조물에 의한 항력을 고려하고, TKE 증가를 고려하였다. 또한 열적 효과는 온도방정식과 지표에너지수지 모수화를 통해 도시 내 빌딩들 사이의 복사간섭과 그림자효과가 고려되었다(Hwang *et al.*, 2010). uMM5 모델링 영역, 기간 및 수행방법은 Hwang *et al.* (2010)의 연구에서 제시된 내용과 동일하다.

모델링 사례기간은 우리나라가 북태평양 고기압의 영향을 지배적으로 받았던 2006년 8월 3일부터 8일간이다. 모델링 영역은 총 5개로 동아시아를 포함하는 가장 큰 첫 번째 영역(81 km 격자간격)부터 부산 지역을 포함하는 마지막 영역(1 km 격자간격)으로 구성된다(그림 1). 연직격자는 첫 번째 영역부터 네 번째 영역까지는 45개의 층으로 구성하고, uMM5를 추

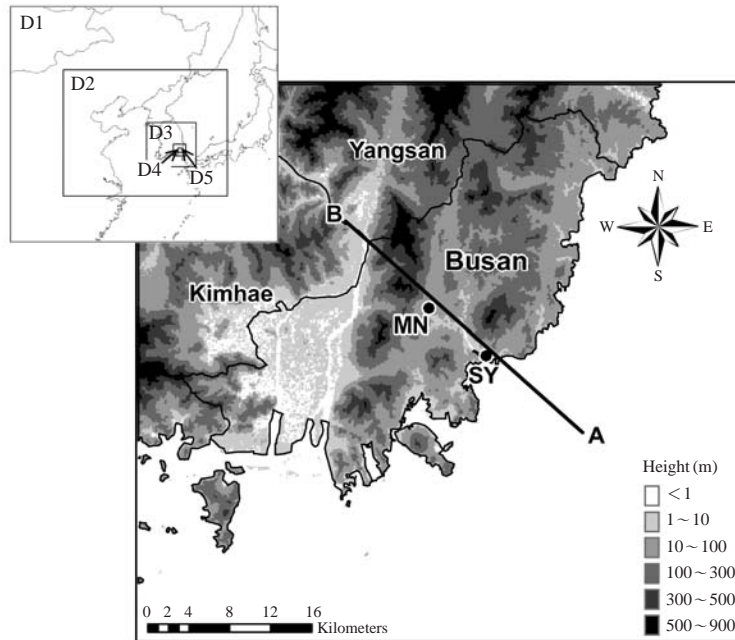


Fig. 1. Five horizontal domains and terrain height of the domain 5 for uMM5 simulation. Thick line (A-B) indicates location of vertical cross section. MN and SY represent Myeongnyun and Suyeong, respectively.

Table 1. Configuration of uMM5.

		Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4	Domain 5
MM5 application		MM5				uMM5
Physical parameterization	Explicit moisture	Mix phase				
	Cumulus	Grell		None		
	PBL	MRF				Modified Gayno-Seaman
	Shallow convection	None				
	Radiation	RRTM				
Surface	Noah LSM				SM2-U(3D) LSM	

가로 수행한 마지막 영역은 하부 100 m 내에 6개 층 (1, 3, 6, 12, 27, 63 m)을 고려하여 연직 37개 층으로 구성하였다. 두 번째부터 마지막 도메인에 대한 모델링은 one-way nesting 방법으로 수행하였으며, 각 영역에 적용된 모수화방안은 표 1과 같다.

2. 2 전선발달함수

해풍전선의 발달(생성 및 강화)과정을 분석하기 위해 전선발달함수(frontogenesis function)를 사용하였다. 선행연구에서 Finkle *et al.* (1995), Kraus (1992),

Kraus *et al.* (1990)은 비행기 관측을 통해 해풍을 집중관측하고 전선함수를 통해 해풍전선의 발달 및 소멸과정을 설명하였다. 한편 Ogawa *et al.* (2003)은 해풍을 발생기, 과도기, 소멸기로 구분하고 이를 전선발달함수의 각 항을 통해 상세한 해풍전선의 생성 및 소멸 단계를 제시한 바 있다. 전선발달함수는 해양과 육지의 온도경도의 시간적 변화를 이용하여 정의되며(Miller, 1948), 이는 전선의 생성 및 강화를 정량적으로 모사할 수 있다(Miller *et al.*, 2003; Ogawa *et al.*, 2003). 이를 간략히 정리하면 다음과 같다.

먼저 일반적으로 남북방향으로 균질하다고 가정했을 때, 2차원 확산방정식에서 온위에 대한 시간적 변화는 식(1)과 같이 정의될 수 있다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{\partial H_x}{\partial x} - \frac{\partial H_z}{\partial z} \quad (1)$$

여기서 θ 는 온위, H_x 와 H_z 는 각각 $\overline{u'\theta'}$, $\overline{w'\theta'}$ 을 각각 의미한다. 정상상태를 가정하고 난류확산에 대해 정리하면 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 이 식은 난류 확산은 u , w 성분에서 의한 온위이류로 나타내어질 수 있음을 의미하는 것으로, 이후 전선발달함수의 비단열적 가열항은 이 식을 통해 얻어질 수 있다.

$$\nabla H = \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2)$$

마지막으로 전선발달함수의 정의에 따라 식(1)에 θ 에 대해 x 방향으로 전미분을 취해 온위경도에 따른 시간변화율을 적용하면 아래와 같이 정의될 수 있다 (Arritt, 1993; Garratt and Physick, 1987).

$$F = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = - \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)}_{[1]} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \underbrace{\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)}_{[2]} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \nabla H \quad (3)$$

식(3)은 수평 수렴항([1]항, 이후 수렴항), 연직적인 기울기(tilt)항([2]항, 이후 기울기항), 비단열적 가열에 의한 수평변동으로([3]항, 이후 비단열적 가열항)로 이루어진다(Kraus *et al.*, 1990). 다시 말해 전선발달함수는 식(3)을 통해 얻어질 수 있으며, 이 전선함수값이 양의 값을 가질 경우 전선발달(frontogenesis), 음의 값을 가질 경우 전선소멸(frontolysis)을 의미한다. 본 연구에서는 해풍 진입방향과 이 방향에 따라 뚜렷한 온도경도를 고려해, 그림 1의 A-B 단면을 x 축으로 2차원 해풍발달함수를 적용하였다.

전선발달 관점에서 Kraus *et al.* (1990)가 제시한 각 항의 의미를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 수평 수렴항(식(3)의 [1]항)은 수평 온도경도의 수렴 효과로서, 수평온도이류에 의한 열역학적 효과이다. 두 번째 항(식(3)의 [2]항)은 연직온위경도의 기울기를 의미하며, 마지막으로 식(3)의 [3]항은 난류열속(turbulent heat flux)에 의한 비단열적 가열로, 식(2)를 통해 온위의 수평/연직이류항의 잔차로 얻어질 수 있다 (Kraus, 1992).

3. 연구결과

uMM5 모델링결과, 지표부근 해풍의 유입과 수렴 등의 전반적인 중규모 기상현상이 모델링 기간 동안 잘 재현되었다. 모델링결과와 신뢰성 검증은 Hwang *et al.* (2010)의 연구에서 확인할 수 있다. 본 연구에서는 8일간의 모델링 결과 중 해풍/해풍전선이 가장 뚜렷하게 나타난 2006년 8월 6일을 대상으로 해풍의 연직 구조 및 해풍전선 발달과정과 강도에 대한 분석결과를 제시하였다.

3.1 해풍의 연직 온위 분포

그림 2는 대기 하층에서부터 2km까지의 온위 및 바람의 분포를 보여준다. 여기서 연직단면의 방향은 부산도심을 중심으로 해풍 진입방향을 고려하여 결정하였다(그림 1의 A-B선). 단면 그림에서 굵은 점선은 수평풍속이 0인 ZVB (Zero Velocity Boundary)를 나타낸 것으로, 이는 밀도가 높은 해양 기괴와 밀도가 낮은 육지 기괴 사이의 경계를 의미하며 해풍의 유입을 뚜렷이 확인할 수 있다(Sha *et al.*, 1991).

0500 LST 온위분포는 대기가 성층화되어 강한 안정층이 형성되었음을 보여준다. 북서지역으로부터 연직 1km 이하에서 북서풍(육풍)이 유입되어 산을 넘은 기괴는 도심을 통과하여 해양으로 유출된다. 이때 도심을 통과하며 도시구조물에 의한 항력영향으로 약 200m까지 약 2 m s^{-1} 이하의 저풍속대가 형성된 것으로 분석된다. 0900 LST에는 해안선부근(수영연안)에서 200m 이내에서 해풍 발달이 시작되었음을 ZVB를 통해 확인할 수 있고, 그 상부에는 상대적으로 밀도가 낮은 내륙의 공기괴가 반류로서 인근해양으로 유출되어 해풍 구조가 나타나기 시작한다. 하지만 아직 해풍머리는 뚜렷하게 발달하진 않았다. 한편 도심지역은 아직 해풍이 유입되진 못했지만, 지표가열과 함께 혼합층(약 700m)이 발달하기 시작한다. 부산외곽지역은 종관류의 영향으로 북서풍이 지속적으로 유입되는 모습이다.

1200 LST에는 해풍머리를 비롯한 뚜렷한 해풍 구조를 확인할 수 있다. 구체적으로 살펴보면, 해풍(ZVB 기준)은 연안에서 약 400m의 높이를 가지고 있으며 내륙으로 진입한 해풍머리는 약 600m에 달하였다. Simpson *et al.* (1977)은 잘 발달된 해풍의 경우, 해풍머리는 해풍두께의 약 2배에 달함을 밝힌 바

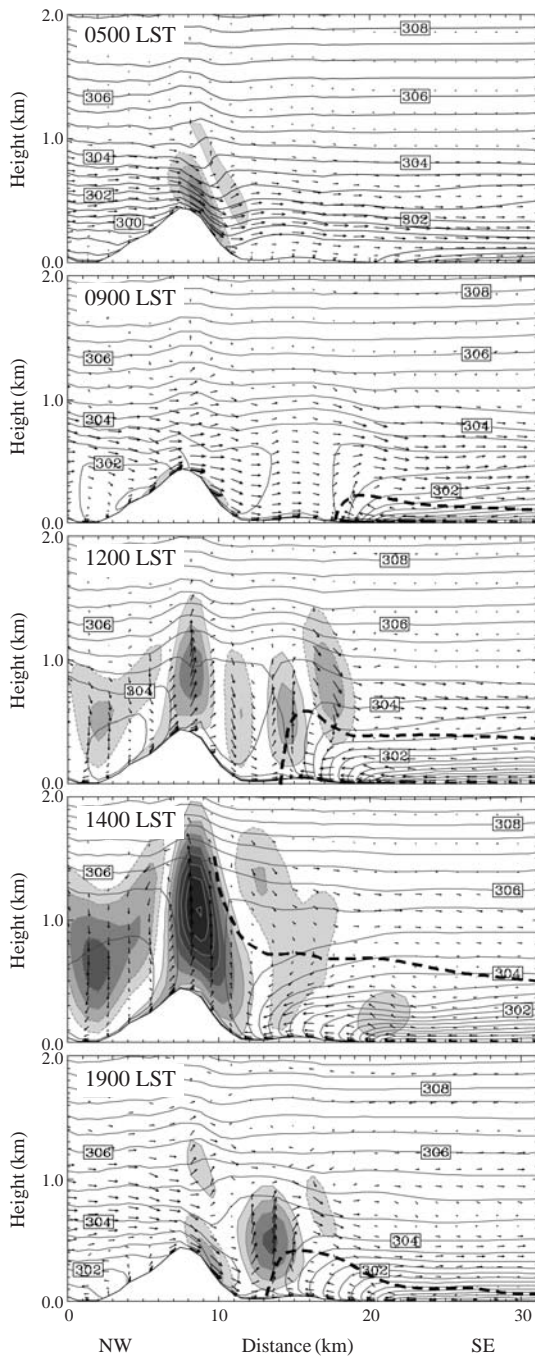


Fig. 2. Vertical distributions of potential temperature (solid line; interval=0.5 K), circulation wind vector (arrow) and vertical wind speed (shaded counter; interval=0.1 m s⁻¹) in the plane of the cross-section along line A-B on 6 August 2006. The zero-velocity boundary (broken line) represents the sea-breeze.

있는데, 본 모델의 결과와 비교할 만하다. 해풍의 발달과 함께 내륙으로 약 5 km 진입하였으며, 해풍전면에서는 해양류가 하층으로 침투하면서 유도된 해풍전면의 상승류(약 0.2 m s⁻¹)를 확인할 수 있다. 해풍전선머리 바로 후면(해양쪽)의 하강기류는 연안에서 약 500 m 상부에서 해풍반류(약 2 m s⁻¹)로 존재하였다. 한편 동쪽산사면을 따라 도심으로 유입되는 기류를 확인할 수 있으며, 이 때 동쪽과 서쪽 산사면에 각각 하향 경사풍, 상향 경사풍이 발달한 것으로 미루어, 산정상에서의 연직상승기류는 열적 상승보다 기계적 상승이 주요 원인으로 분석된다. 산사면을 따라 도심으로 유입된 북서풍과 함께 수렴이 나타나고 도심지에 연직혼합층이 발달하였다.

이후 1400 LST에는 1200 LST에 비해 해풍이 약 3~4 km 전진함에 그쳐 해풍침투가 아주 약하게 나타났다. 여기서 산정상에서의 연직성분과 함께 약 1,500 m까지 나타난 해풍전면의 강한 상승기류(최대 0.8 m s⁻¹)에 주목할 필요가 있다. 1200 LST에서 제시되었던 종관바람에 의한 기계적 상승으로 유도된 바람과 해풍이 산사면에서 수렴에 의한 강한 상승기류를 발생시킨 것으로 사료된다. 이와 같은 강한 상승류는 해풍전선 발생의 중요한 인자로 여러 선행연구에서 제시된 바 있으며, Arritt (1993)는 해풍발달함수를 통해 수평인자와 같은 크기로 연직성분이 중요함을 밝혔으며, Helmis *et al.* (1987)은 8월 6일 사례일과 유사하게 하안풍이 존재할 경우 해풍전선에서 2 m s⁻¹ 이상의 강한 상승류가 발생할 수도 있다고 하였다.

1600 LST는 해풍이 더 이상 내륙으로 침투하지 못하고 1400 LST와 유사한 분포를 보였다(그림 생략). 이는 종관바람의 영향으로 분석되며, Oh *et al.* (2006)에서도 종관바람(하안풍)에 의해 늦은 오후까지 해풍침투가 도시 내로 국한될 수 있음을 보인 바 있다. 해풍전면의 강한 상승류도 1400 LST와 유사하게 0.7 m s⁻¹로 유지되고 있다. 일몰 후 1900 LST에는 해풍 약화로 해풍전면의 연직속도의 감소(0.4 m s⁻¹)와 함께 산사면의 하강기류가 강화되며, 혼합층(약 800 m)은 점차 감소하는 모습이다. 이후 2300 LST에는 내륙에 완전히 해풍이 소멸되었고, 야간안전층이 형성되었다(그림 생략).

3.2 해풍전선 발달과 기여인자

본 장에서는 2.2절에서 제시한 전선발달함수를 이

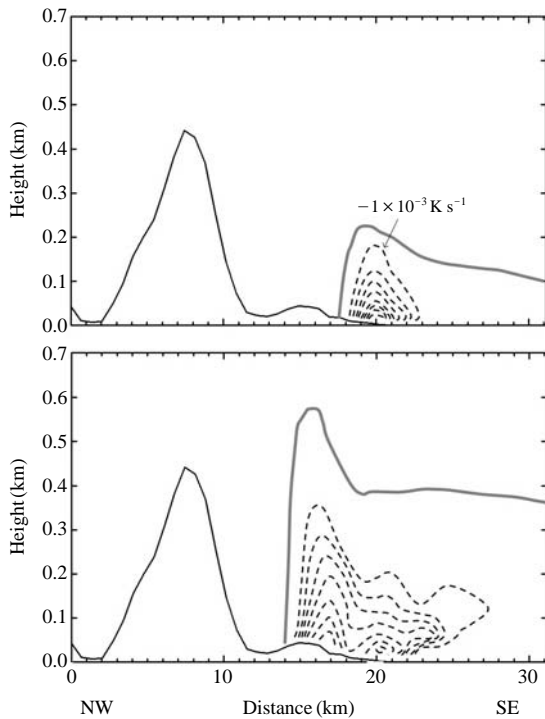


Fig. 3. Two-dimensional turbulent heat flux (interval= $1 \times 10^{-3} \text{ K s}^{-1}$) for in the plane of the cross-section along line A-B at 0900 LST (upper) and 1200 LST (lower) on 6 August 2006. Full contours express positive value, dashed contours negative value, respectively. The zero-velocity boundary (gray solid line) represents the sea-breeze.

용하여 해풍전선의 발달과 기여인자를 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 해풍 발생시점 (0900 LST)과 침투시점 (1200 LST)의 전선함수값(F) 및 식(3)의 수렴항, 기울기항, 비단열적 가열항을 계산하여 연직적 분포를 제시하였다. 우선 식(3)의 비단열적 가열항을 얻기 위해 식(2)를 통해 계산된 난류열속(turbulent heat flux)에 대하여 제시하고, 이후 전선함수값과 각 항에 대하여 구체적으로 비교분석하였다. 여기서 동서바람성분은 동풍(해풍진행방향)을 양의 값으로 고려하고, 해풍이 유입되는 대기하층의 변화를 보기 위해 연직적으로 700 m 이하의 층별 연직 난류열속을 제시하였다.

그림 3은 2006년 8월 6일 해풍 발생시점(0900 LST)과 침투시점(1200 LST)의 난류열속의 변화를 나타내었다. 두 시간대의 해풍 유입과 함께 나타난 대기하

층의 음의 수치로, 수렴에 의한 난류열속이 존재함을 알 수 있다. 참고로 두 시간대의 수렴 및 연직풍속 크기가 10배 이상의 차이를 보여 수평온도이류가 지배적인 역할을 하였고(그림 생략), 이는 해풍에 의한 해양으로부터의 수평 냉기류 이류가 난류열속을 지배함을 의미한다. 두 시간대를 비교해보면, 해풍의 유입에 따른 해안선부근의 수렴(음의 난류열속)현상은 그 강도와 범위에서 뚜렷한 차이가 나타났다. 구체적으로 0900 LST는 해풍전선의 바로 후면 고도 200 m 이하로 국한되어(지표부근에 최고 $7 \times 10^{-3} \text{ K s}^{-1}$) 좁게 나타난 반면, 1200 LST는 해풍의 내륙침투(발달)에 따라 해풍전선 후면으로 인근해상까지 넓게 분포하며 400 m 고도까지 수렴현상이 나타났다.

그림 4와 5는 전선발달함수(식(3))의 수렴항, 기울기항, 비단열적 가열항의 계산값을 제시한 것으로, 0900 LST와 1200 LST의 연직분포이다. 0900 LST의 경우(그림 4), 수평수렴항은 해풍전선면을 중심으로 양의 값을 나타내었고 지표에서 가장 큰 값($11 \times 10^{-6} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)이 존재한다. 이러한 결과는 해풍전선후면의 수평이류로 해풍전면의 온도경도증가와 더불어 수평바람성분의 수렴때문으로 해석할 수 있다. 두 번째 기울기항은 연직방향의 온도경도와 연직바람성분의 수평경도에 의존하므로, 해풍전면에서는 거의 온위가 연직적으로 일정하여 거의 0에 가까운 값을 나타내는 반면 해풍전선 후면으로 음의 값을 보였다(해안선의 고도 100 m 부근에서 최소값: $-3 \times 10^{-6} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$). 다시 말해, 해풍전선 후면으로 기울기항에 의한 전선소멸효과가 나타남을 알 수 있다. 마지막으로 비단열적 가열항은 해풍 후면의 해안선 지표부근에 양의 값(최대: $1 \times 10^{-6} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)을, 해상에서 음의 값이 나타났다. 하지만 수렴항과 기울기항에 비해 상대적으로 적은 1/10 크기를 가져 해풍전선 발생에 기여하는 크기가 적음을 알 수 있다. Arritt (1993)는 비단열적 가열항은 위 두 항(수렴항 및 기울기항)에 비해 약 1/10배 이상의 크기 차이를 보여 거의 무시될 수 있음을 제시한 바 있다.

해풍이 도심까지 잘 발달된 1200 LST의 경우(그림 5), 수렴항은 해풍전선면 부근 지표에서 최대값(약 $7 \times 10^{-6} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)이 나타나며 고도 약 500 m까지 양의 값이 분포하였다. 이는 해풍전선면에서의 수평 온위와 바람의 강한 수렴효과로 결과로 해석되며 Reible *et al.* (1993)와 Finkle *et al.* (1995)의 관측결과

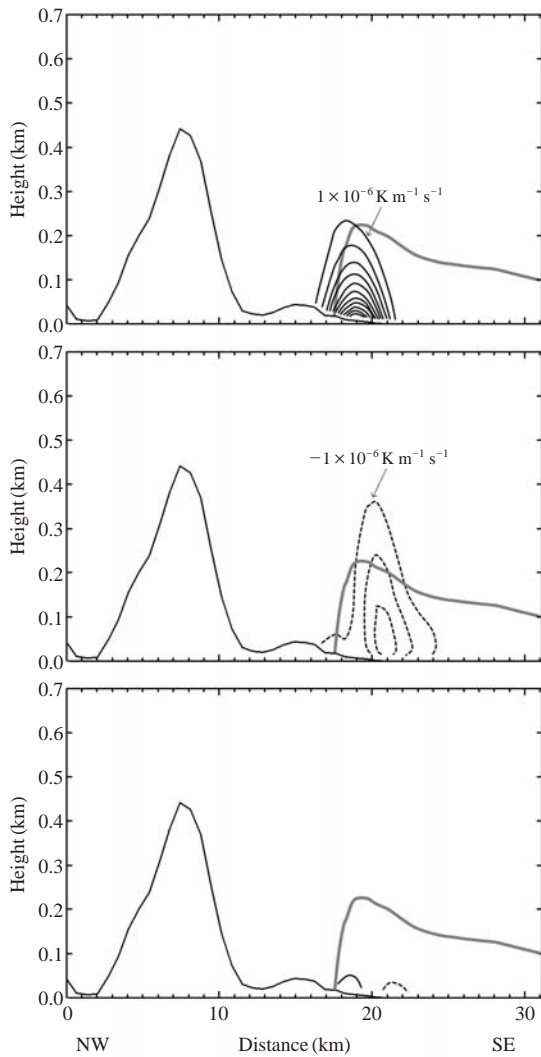


Fig. 4. Each term for frontogenesis function of θ -field (interval= $1 \times 10^{-6} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) at 0900 LST on 6 August 2006 in the plane of the cross-section along line A-B in Fig. 1. (a) confluence term, (b) tilting term, and (c) diabatic heating term. Full contours express frontogenetic, dashed contours frontolytic effects, respectively. The zero-velocity boundary (gray solid line) represents the sea-breeze.

및 Arritt (1993)의 수치모의 결과와 유사하다. 한편 양의 수렴역 바로 후면에 고도 1 km 이내 약한 음의 수렴역이 나타났다. 이는 해안선을 지나 해풍이 내륙으로 침투하면서 해풍 후면에 극지적으로 수평풍속 증가로 나타난 결과이다. 또한 해안선부근에는 다시 약

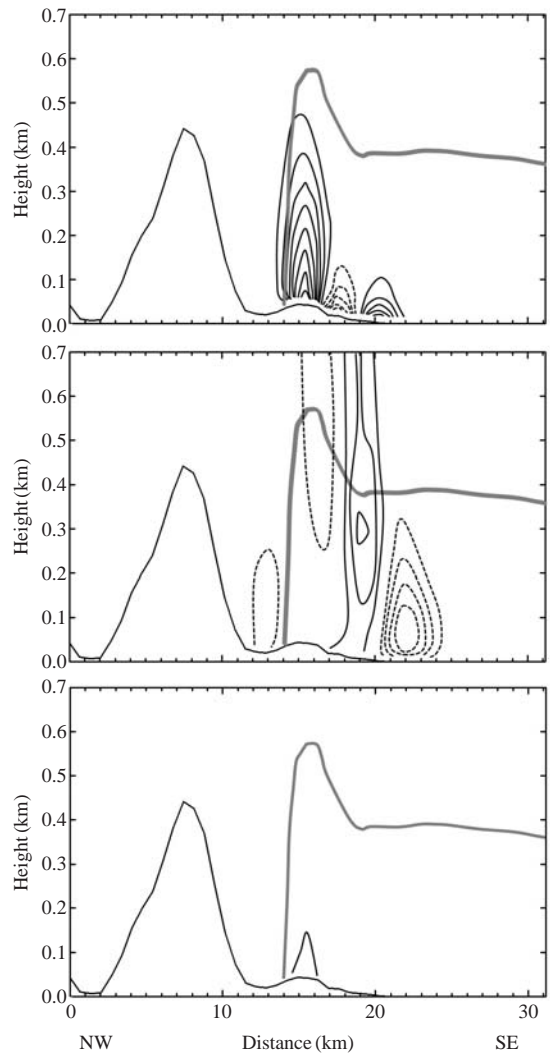


Fig. 5. The same as Fig. 4, but at 1200 LST.

한 수렴역이 나타나는데 이는 내륙과 해양간의 지표 마찰력의 차이로 인한 해풍의 풍속감소 때문이다. 결과적으로 역학적으로 풍속감소에 의한 수렴효과가 나타나는 지점은 전선생성효과가 나타나는 반면, 풍속증가 지점은 전선소멸효과가 나타날 수 있다. 기울기향의 경우, 해풍전면의 도시혼합층 부근과 해풍머리부근에는 음의 분포를 볼 수 있다. 이는 해풍전면에서의 상승기류(양의 연직속도 성분)로 인해 해풍 침투방향으로 연직속도가 수평적으로 증가경향을 나타내기 때문이다. 한편 해풍머리 후면에서는 하강기

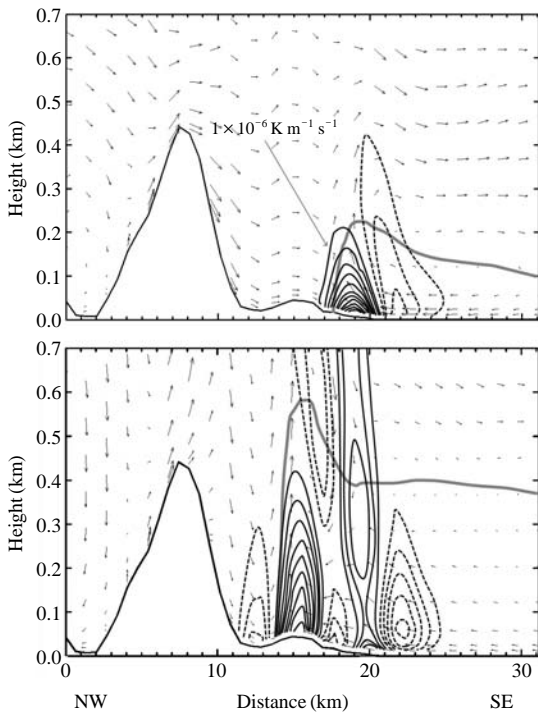


Fig. 6. Frontogenesis of θ -field (interval= $1 \times 10^{-6} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) at 0900 LST (upper) and 1200 LST (lower) on 6 August 2006 in the plane of the cross-section along line A-B in Fig. 1. Full contours express frontogenetic, dashed contours frontolytic effects, respectively. The zero-velocity boundary (gray solid line) represents the sea-breeze.

류(음의 연속속도성분)가 발달하여 결과적으로 기울기향은 양의 값을 나타내었다. 비단열적 가열향은 해풍전선 바로 후면에서 양의 값을 볼 수 있다. 이는 Kraus *et al.* (1990)이 해풍전선의 온도경도가 최대인 지점의 바로 후면에서 최대값이 나타나는 결과와 일치한다. 0900 LST와 비교해서는 지표가열로 인한 비단열적 가열향의 값이 약간 상승하였지만, 0900 LST 결과와 마찬가지로 수렴향 및 기울기향에 비해서는 매우 적다.

그림 6은 위에서 언급한 수렴향, 기울기향, 가열향의 합인 전선함수값의 연직분포로, 양의 값(검은 실선)과 음의 값(검은 점선)을 가질 경우 각각 전선 발달효과와 소멸효과를 의미한다. 이와 함께 ZVB(그림 6의 회색실선)를 통해 해풍 유입을 나타내었다. 0900 LST의 전선함수값은 해풍전선 후면에서 해안선을 중

심으로 내륙으로는 양의 값을 나타낸 반면, 해안선을 중심으로 3 km 수평범위로는 음의 값을 나타내고 있다. 이러한 분포는 앞서 제시한 해풍전면의 강한 수렴수렴향이 양의 값으로 해풍 발생에 가장 큰 영향을 미친 반면, 기울기향은 해풍 발달을 제한하는 효과로 작용하여, 결과적으로 해풍전선 발달은 역학적 향(수렴향과 기울기향)에 의해 지배됨을 확인할 수 있다. 다시 말해 해풍전면에서는 강한 온도경도의 발생에 의해 해풍 발달이 가속화가 진행되는 반면, 해풍후면의 연안부근에서는 해풍소멸효과도 동시에 작용함을 알 수 있다.

1200 LST의 경우, 해풍전선 부근에는 강한 양의 해풍전선 강화가 뚜렷하게 나타나는 모습으로 지표에서 최대값을 보이고 연직적으로 감소하고 있다. 해풍후면으로 약한 해풍 소멸효과가 작용하긴 하지만, 지표 해안선부근과 해풍머리 후면으로 해풍전선 생성효과가 다시 강하게 나타났다. 한편 도심의 해풍전면에는 약한 해풍전선 소멸효과가 발생하였다. 이 분포는 Kraus *et al.* (1990)에서 비행기 관측을 통해 제시된 전선함수값의 공간적 분포와 유사한 패턴을 보였다. 특징적으로 해풍 발생시점과 비교해서 해풍전선 부근의 양의 해풍전선 최대값($10 \times 10^{-6} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)은 유사하지만 공간적으로 400 m 부근까지 양의 값 영역이 확대되며, 해안선부근에서도 지속적으로 양의 값($4 \times 10^{-6} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)을 보이고 있다.

6일의 해풍전선 발달에 있어 수렴효과의 중요성은 모델링 기간 중 7일과 8일과의 비교를 통해 확인할 수 있다. 구체적으로 살펴보면, 해풍 침투가 도심으로 제한됨으로서 특히 도심을 중심으로 발달한 수렴효과에 의해 해풍전선이 약 600 m 부근까지 해풍전선이 발달하는데 중요한 역할을 한 것으로 사료된다. 7일과 8일의 경우, 기울기향의 크기는 6일과 유사하였지만 수렴효과는 $0 \sim 4 \times 10^{-6} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (6일의 약 35%)에 그쳐 해풍전선 발달에 있어 수렴효과의 중요성을 뒷받침할 수 있다(그림 생략). 결과적으로 해풍전선 구조는 전선함수의 수렴향과 기울기향에 의해 지배를 받으며, 특히 수렴향이 해풍전선 발달에 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 연안도시 부산지역을 대상으로 두

렸한 해풍 발달이 나타난 2006년 8월 6일을 대상으로 uMM5를 이용하여 수치모델링을 수행하고 해풍 구조 및 해풍전선 강도를 집중분석하였다. 특히 모델링결과에 전선발달함수를 적용해 해풍전선 구조와 강도에 대해 정량적으로 분석하였다.

사례일은 종관적으로 약한 하안풍 하에 해풍은 정오경 부산도심까지 발달하였으며, 연직적으로는 1km 이하에서 해풍머리부근의 상승기류 발달과 그 상부에서 해풍반류가 뚜렷이 묘사되었다. 해풍전선의 발달을 전선발달함수를 통해 계산한 결과, 공간적으로 해풍전선의 생성 및 소멸효과가 복잡하게 나타남을 재확인할 수 있었다. 또한 전선발달함수의 수평향과 기울기향이 비단열적 가열함에 비해 그 크기가 10배 이상을 나타내어, 수평/연직바람 성분의 수평경도에 의한 역학적 효과가 해풍전선의 생성 및 소멸을 결정 짓는 것으로 분석되었고, 특히 본 사례일은 수평효과가 해풍발달에 중요한 역할을 하였음을 정량적으로 확인·평가할 수 있었다. 본 연구는 도시효과를 고려함으로써 현실적인 연안도시지역 해풍(전선)을 정량적으로 분석하였다는데 의의가 있으며, 이는 향후 연안도시 지역특유의 대기환경을 정확히 이해하고 평가하는데 도움이 되리라 기대된다.

감사의 글

이 논문은 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3308)의 지원 및 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2010-355-C00121)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- Arritt, R.W. (1993) Effects of the large-scale flow on characteristic features of the sea breeze, *Journal of Applied Meteorology*, 32, 116-125.
- Atkinson, B.W. (1981) *Mesoscale Atmospheric Circulations*, Academic Press, London.
- Bailey, P.A. and K.C.S. Kwok (1985) Interference excitation of twin tall buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 21, 323-338.
- Barbato, J.P. (1975) The sea breeze of the Boston area and its effect on the urban atmosphere, Ph.D. dissertation, Boston University, Boston, Mass.
- Emmanuel, R. and E. Johansson (2006) Influence of urban morphology and sea breeze on hot humid microclimate: the case of Colombo, Sri Lanka, *Climate Research*, 30, 189-200.
- Finkele, K., J.M. Hacker, H. Kraus, and R.A.D. Byron-scott (1995) A complete sea-breeze circulation cell derived from aircraft observations, *Boundary-Layer Meteorology*, 73, 299-317.
- Garratt, J.R. and W.L. Physick (1987) Numerical study of atmospheric gravity currents. Part II: Evolution and external influences, *Beitraege zur Physik der Atmosphaere*, 60, 88-102.
- Helmis, C.G., D.N. Asimakopoulos, D.G. Deligiorgi, and D.P. Lalas (1987) Observations of sea-breeze fronts near the shoreline, *Boundary-Layer Meteorology*, 38, 395-410.
- Helmis, C.G., K.H. Papadopoulos, J.A. Kalogiros, A.T. Soilemes, and D.N. Asimakopoulos (1995) Influence of background flow on evolution of Saronic Gulf sea breeze, *Atmospheric Environment*, 29, 3689-3701.
- Hsu, S.A. (1988) *Coastal Meteorology*, Academic, San Diego, Calif., 260 pp.
- Hwang, M.-K., Y.-K. Kim, O.-B. Oh, and Y.-H. Kang (2010) High-resolution simulation of meteorological fields over the coastal area with urban building, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26, 137-150. (in Korean with English abstract)
- Jeong, J.-H., Y.-K. Kim, Y.-S. Moon, and M.-K. Hwang (2007) Intercomparison of wind and air temperature fields of meteorological model for forecasting air quality in Seoul metropolitan area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23, 631-767. (in Korean with English abstract)
- Kraus, H. (1992) Turbulence frontogenesis, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 48, 309-315.
- Kraus, H., J.M. Hacker, and J. Hartmann (1990) An observational aircraft-based study of sea-breeze frontogenesis, *Boundary-Layer Meteorology*, 53, 223-265.
- Lee, C.B., J.C. Kim, and T.H. Cheon (2009) Effects study on the accuracy of photochemical modeling to MM5 four dimensional data assimilation using satellite data, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25, 264-274. (in Korean with English abstract)
- Miller, J.E. (1948) On the concept of frontogenesis, *Journal of Meteorology*, 5, 169-171.
- Miller, S.T.K., B.D. Keim, R.W. Talbot, and H. Mao (2003) Sea

- breeze: structure, forecasting, and impacts, *Reviews of Geophysics*, 41, doi:10.1029/2003RG000124.
- Nichol, J.E. (1996). High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study, *Journal of Applied Meteorology*, 35, 135-146.
- Ogawa, S., W. Sha, T. Iwasaki, and Z. Wang (2003) A numerical study on the interaction of a sea-breeze front with convective cells in the daytime boundary layer, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 31, 635-651.
- Oh, I.-B., Y.-K. Kim, H.W. Lee, and C.-H. Kim (2006) An observational and numerical study of the effects of the late sea breeze on ozone distributions in the Busan metropolitan area, Korea, *Atmospheric Environment*, 40, 1284-1298.
- Reible, D.D., J.E. Simpson, and P.F. Linden (1993) The sea breeze and gravity-current frontogenesis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 119, 1-16.
- Sha, W., T. Kawamura, and H. Ueda (1991) A numerical study on sea/land breezes as a gravity current: Kelvin-Helmholtz Billows and inland penetration of the sea-breeze front, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48, 1649-1665.
- Simpson, J.E. (1969) A comparison between laboratory currents and atmospheric density currents, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 95, 758-765.
- Simpson, J.E. (1994) *Sea breeze and local wind*, Cambridge University Press, New York.
- Simpson, J.E., D.A. Mansfield, and J.R. Milford (1977) Inland penetration of sea-breeze fronts, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103, 47-76.
- Song, S.-K., Z.-H. Shon, Y.-K. Kim, Y.-H. Kang, I.-B. Oh, and C.-H. Jung (2010) Influence of ship emissions on ozone concentrations around coastal areas during summer season, *Atmospheric Environment*, 44, 713-723.
- Taniike, Y. (1992) Interference mechanism for enhanced wind forces on neighbouring tall buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 42, 1073-1083.
- Tijm, A.B.C., A.A.M. Holtstg, and A.J. van Delen (1999) Observations and modeling of the sea breeze with the return current, *Monthly Weather Review*, 127, 625-640.
- Yang, L. and Y. Li (2009) City ventilation of Hong Kong at no-wind conditions, *Atmospheric Environment*, 53, 3111-3121.
- Zhang, W.J., K.C.S. Kwok, and Y.L. Xu (1994) Aeroelastic torsional behaviour of tall buildings in wakes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51, 229-248.