

산악지역 도로건설에 따른 국지 대기순환의 변화에 관한 연구

이순환^{1,*} · 황수진² · 서광수²

¹조선대학교 아시아몬순·기후환경연구소, 501-759, 광주광역시 동구 서석동 275번지

²부산대학교 지구과학교육과, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

Study on Variation of Local Atmospheric Circulation Due to Road Development in Mountain Area

Soon-Hwan Lee^{1,*}, Soo-Jin Hwang², and Kwang-Soo Seo²

¹Center for Asia Monsoon and Climate Environment Research, Chosun University,
501-759 Seseok-dong Dong-gu Gwangju, Korea

²Department of Earth science, Pusan National University,
609-735 San-30 Jangjeon-dong Kuemjung-gu, Busan, Korea

Abstract: In order to clarify the efficiency of ground level change in Ice-valley on atmospheric circulation, numerical experiment was carried out. The circulations over the slope in North and South are different due to the topography and short wave radiation in Ice-valley. Therefore the circulations in both side are asymmetric and the asymmetric circulations are kept on at 1800 LST. A small difference of the atmospheric circulations formation is made due to the road construction at night. The reason may be the weakness of sensible heat flux from the road and other factors except that the sensible heat is not a principal factor in road construction. The construction of road is associated with growing of sensible heat from the road surface. For this reason, in case of daytime, ascending wind in north slope is more stronger with the road than that without road. The maximum wind speed becomes 4.67 m/s after road construction. And the position of the road is also an important factor in estimation of mesoscale circulation in mountainous area.

Keywords: mesoscale circulation, numerical model, Ice-valley, valley wind, road construction

요약: 얼음골 주변의 지표면 변화에 따른 중규모 대기순환장에 미치는 효과를 보기위하여 수치실험을 실시하였다. 얼음골 남북 경사면에서 발생하는 순환장은 지형과 단파복사에 의한 영향으로 다르게 나타나며, 비대칭을 이룬다. 그리고 이러한 비대칭은 18시까지 계속된다. 야간의 경우, 도로건설에 따른 대기순환장의 차이는 크지 않다. 이것은 주간 단파복사에 의한 현열플러스가 감소하며, 현열플러스외의 다른 요소는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 도로의 건설은 현열플러스의 증가와 관련되고, 주간 경우, 지형에 의한 곡풍과 결합하여 도로가 없는 경우에 비하여 상승류가 강해진다. 최대풍속은 4.67 m/s이다. 그리고 이때 도로의 위치역시 주요한 요인으로 작용한다.

주요어: 중규모순환, 수치모형, 얼음골, 곡풍, 도로건설

서론

지표면 환경변화에 따른 국지기상의 변화에 관한 연구는 급격히 도시화가 진행된 80년대부터 활발히 진행되어졌다. 이러한 도시화는 인간생활 및 사회전

반에 많은 영향을 주고 있다. Yoshikado와 Kondo (1989)는 해풍전선의 이동속도가 도쿄 부근에서 작아지는 것을 관측하고, 해풍전선 이동속도의 변화를 도쿄의 도시화와 관련지어 설명하였다. 이순환 등 (2001)은 부산지역을 중심으로 한 도시화에 따른 대기오염물질의 이동에 관한 수치 실험을 통하여 도시는 큰 열적장애물로 작용하며, 해안에 접해 있을 경우 중규모 기류의 변화는 더욱 복잡한 양상을 나타내고, 이들 지역의 해풍의 발달은 도시의 열적인 영

*Corresponding author: leesh@chosun.ac.kr

Tel: 82-62-230-7714

Fax: 82-62-230-7936

향을 받고 있다는 것을 밝혔다. 이처럼 도시화에 따른 중규모 기류의 변화에 관한 연구는 주로 해안 지역의 도시를 중심으로 이루어져왔다.

그러나 현재 관광 레저 산업의 발달과 더불어 산악지역에서의 관광자원 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 경상남도 밀양 얼음골지역은 독특한 기상현상이 나타나는 지역으로 매년 수만의 관광객이 유입되는 한반도 동남부의 관광지이다. 얼음골은 경상남도 밀양시 산내면 남평리에 소재하고 있는데, 4월부터 8월까지 결빙이 발생하는 기이한 현상으로 천연 기념물 224호로 지정되어 있다. 얼음골의 남쪽으로는 천황산, 북쪽은 백운산, 운문산, 가지산이 분포하고 있다. 얼음골의 남쪽과 북쪽의 산들로 이루어진 동서 방향으로 발달한 계곡의 북쪽 사면에 위치하고 있다. 얼음골에서는 하계 고온의 기온상태에서 암반주위에 얼음이 형성되고, 겨울이 되면서 얼음이 사라지는 특이한 기상현상이 발생한다. 문승의 와 황수진(1977)은 얼음골 형성에 대한 기화열이론을 제시하였다. 이들은 밀양얼음골의 지상관측을 통하여 얼음골 지하암반내에 지하수가 존재하고, 이들이 대기와의 온도차에 의해서 기화되면서 대기에너지를 흡수하여 기온이 떨어지는 것으로 보았다. 이주호 등(1994)은 테일러스 구조는 공기가 큰 저항을 받지 않고 잘 흐를 수 있는 구조로 되어 있다고 보고, 자연대류설을 제시하였고, Tanaka et al.(2000)은 문승의와 황수진(1977)의 이론을 바탕으로 선택적 대류결빙설을 제시하였다. 그리고 선택적 대류이론에 입각한 얼음골의 수치실험을 실시하여, 찬 공기가 겨울동안 테일러스 내부 깊숙이 침투하여 겨울의 얼음이 그 이듬해 여름까지 존재해 있다는 선택적 대류이론을 뒷받침하였다.

결빙에 관한 여러 가지 이론에서의 공통점은 테일러스 내부에서 흐르는 지하수가 존재하고 수온은 시간 지연 효과가 나타나 여름에는 낮고, 오히려 겨울에 높다고 생각한다. 또한 테일러스의 공극 사이로 기류가 유입-유출되는데, 여름에는 상단에서 유입되고 하단에서 유출되며 겨울에는 반대의 기류가 형성된다. 겨울의 낮은 기온을 가진 기류가 테일러스 내부를 냉각시키고, 그 효과가 여름에 나타나는 것이다. 따라서 겨울철에 일어나는 냉각의 정도가 여름철의 결빙을 좌우하는 것으로 연구자들은 결론짓고 있으며, 겨울철에 냉각이 클수록, 즉 기온이 낮을수록 결빙현상이 잘 일어난다. 그러므로 얼음골지역에서의 여름과 겨울기온변화가 다음해 얼음골의 결빙현상에

영향을 미친다고 결론지었다.

그러나 이들 관광지의 경우, 관광객의 편의를 위하여 대규모 도로공사등 교통시설이 확충되고 있다. 이것은 교통량의 직접적인 증가로 연결되며, 교통량의 증가는 산악지역의 열적인 대기환경의 변화를 가져온다. 산악지역의 경우 기상학적으로 일정한 폐쇄성을 가지고 있으므로, 작은 인공열의 증가는 대기환경에 크게 영향을 미친다. Lee 와 Kimura(2001)은 지형에 의하여 형성되는 산곡풍과 인공열에 의하여 발생하는 전원풍(land-land breeze)의 비교를 통하여 산악의 경우 중규모 순환장에 직접적이며, 빠른 반응성을 보이고, 토지이용에 의하여 발생한 인공열은 상대적으로 느린 반응성을 나타낸다고 보고 하였다. 그러므로 산악지역에서의 도시개발과 도로건설에 따르는 대기 순환장의 변화는 매우 복잡한 양상을 나타낼 것이라고 판단되어진다.

터널 및 도로 건설이 얼음골에 주는 영향을 평가하기 위해서는 도로 및 터널 건설로 인하여 발생하는 국지적인 온실 기체 증가량을 구하고 이를 이용하여 대기의 승온 효과를 계산하는 과정이 필요하다. 또한 도로 건설로 인하여 지표면의 알베도가 변화하여 열수지가 변화하고 차량통행으로 인하여 인공열이 배출된다. 이러한 지표면 상태변화와 인공열 배출의 영향을 평가하는 것이 필요하다.

그리고 밀양 얼음골에서 지표면 환경변화에 따른 중규모 순환장의 온도와 기류 변화가 관광자원에 직접적으로 영향을 미친다는 점에서 지표면 변화에 따른 기류의 변화를 연구하는 것은 매우중요하다. 그리고 산악지역이 가지는 특수한 기상학적인 환경속에서 교통량 증가로 발생하는 인공열이 중규모 기류 변화에 미치는 영향을 파악해 봄으로써 대기환경과 자원 개발의 상호관계를 파악할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 밀양 얼음골주변의 도로개발에 의한 교통량의 증가를 예측하고, 이들 교통량증가에 의한 열적 환경변화가 얼음골 주변의 산악기류의 변화에 미치는 영향을 평가하고자한다.

수치모형

모형 방정식

본 연구에 사용된 대기 역학 모형은 SMART (System of Multi-scale Atmospheric and Random particle Transport model) 이다. 이 모형은 Kikuchi et

al.(1983)에 의해 개발된 LCM(Local circulation Model)을 Kimura와 Takahashi(1991)과 Lee(1998)가 비정역학과정과 식생과정을 개량하여 만든 모형이다.

모형의 물리과정은 Kimura와 Takahashi(1991)와 Lee(1998)에 구체적으로 기술되어져 있다. 여기에서 간단한 기본 방정식계와 지표면과정을 기술 하였다.

모형은 3차원 비정역학 대기를 가정하고, 좌표계는 지형 준거 좌표계(Z*)를 채용하였다. 지형 준거 좌표계는 아래와 같다.

$$z^* = Z_T(z - Z_G)/h, h = Z_T - Z_G$$

Z_T, Z_G는 각각 모형의 상단과 지표면의 고도를 의미한다.

모형에서 사용한 운동방정식은

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial hu v}{\partial y} + \frac{\partial hu w^*}{\partial x^*} \\ &= -h\Theta \frac{\partial \Pi'}{\partial x} + h \frac{z_T}{z_T - z_G} \frac{\partial z_G \partial \Pi'}{\partial x \partial z^*} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(h K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv u}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} + \frac{\partial hv w^*}{\partial x^*} \\ &= -h\Theta \frac{\partial \Pi'}{\partial y} + h \frac{z_T}{z_T - z_G} \frac{\partial z_G \partial \Pi'}{\partial y \partial z^*} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(h K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hw^*}{\partial t} + \frac{\partial hw^* u}{\partial x} + \frac{\partial hw^* v}{\partial y} + \frac{\partial hw^* w^*}{\partial x^*} \\ &= -z_T \theta \frac{\partial \Pi'}{\partial y} + gh \frac{\theta}{\Theta} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(h K_H \frac{\partial w^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h K_H \frac{\partial w^*}{\partial y} \right) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_m \frac{\partial w^*}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있으며 연속방정식은

$$\frac{\partial hv}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + \frac{\partial hw^*}{\partial z^*} = 0$$

이고, 비정역학적 상태의 기압은

$$\frac{\partial^2 \Pi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi'}{\partial y^2} + \left[\left(\frac{z_T}{z_T - z_G} \right)^2 + 2 + \left(\frac{z^* - z_T}{h} \right)^2 \left\{ \left(\frac{\partial z_G}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_G}{\partial y} \right)^2 \right\} \right]$$

$$\frac{\partial^2 \Pi'}{\partial z^2} + 2 \frac{z^* - z_T}{h} \frac{\partial z_G}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Pi'}{\partial z} \right) + 2 \frac{z^* - z_T}{h} \frac{\partial z_G}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \Pi'}{\partial z} \right) +$$

$$\frac{z^* - z_T}{h} \left(\frac{\partial^2 z_G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z_G}{\partial y^2} \right) + 2 \frac{z^* - z_T}{h^2} \left[\left(\frac{\partial z_G}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_G}{\partial y} \right)^2 \right]$$

$$\frac{\partial \Pi'}{\partial z} = \frac{1}{\theta h} r(x, y, z^*) \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서,

$$\Pi' = \pi - \pi_H, \quad \frac{\partial \pi_H}{\partial z} = \frac{gh\theta}{\theta^2 z_T}$$

r(x, y, z*) =

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (ADV_X) + \frac{\partial}{\partial y} (ADV_Y) + \frac{z_T}{h} \frac{\partial}{\partial z} (ADV_Z) + \\ & \frac{1}{h} \frac{\partial z_G}{\partial x} \frac{\partial (z^* - z_T)}{\partial z} ADV_X + \frac{1}{h} \frac{\partial z_G}{\partial y} \frac{\partial (z^* - z_T)}{\partial z} ADV_Y, \end{aligned}$$

열역학방정식은

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\theta'}{\partial t} + \frac{\partial h\theta' u}{\partial x} + \frac{\partial h\theta' v}{\partial y} + \frac{\partial h\theta' w^*}{\partial z^*} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(h K_H \frac{\partial \theta'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h K_H \frac{\partial \theta'}{\partial y} \right) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_h \frac{\partial \theta'}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

이며, 비습방정식은

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hq}{\partial t} + \frac{\partial hqu}{\partial x} + \frac{\partial hqv}{\partial y} + \frac{\partial hqw^*}{\partial z^*} = \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(h K_H \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h K_H \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \frac{z_T^2}{h} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_h \frac{\partial q}{\partial z^*} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 z*는 아래와 같이 정의되었다.

$$z^* = z_T \frac{z - z_G}{h}, \quad h = z_T - z_G.$$

그리고 z_G는 지면의 고도이고 z_T는 모형에서 대기의 상한고도이다.

위에서 u, v, w*는 각각 x, y, z 방향의 속도성분

이다. t 는 시간을 나타내며 θ' 는 평균온위(Θ)로부터의 편차를 나타낸다. q 는 비습(kg/kg)이고, T 는 온도(K), K_m 과 K_h 는 운동량과 열, 비습의 연직방향 확산계수($m^2 s^{-1}$)이며 K_H 는 수평방향 확산계수($m^2 s^{-1}$)이다.

모형의 격자는 Arakawa-c격자이며, 이류방정식은 플럭스형을 제외하고, 수평방향의 차분은 4차의 정도 중앙차분을 사용하였다. 본 연구에서는 응결을 고려하지 않은 건조대기를 대상으로 하고 있어서 강수와 증은 포함하지 않는다.

지표면 부근에서 현열과 잠열 플럭스는 모형 대기 최하층에 접지층을 가정할 때 Monin-Obukhov의 상사이론으로부터 구해진다. 또한 운동량 플럭스(τ)도 구해진다. 지표면 부근에서의 현열, 잠열, 운동량 플럭스는 아래와 같이 표현된다.

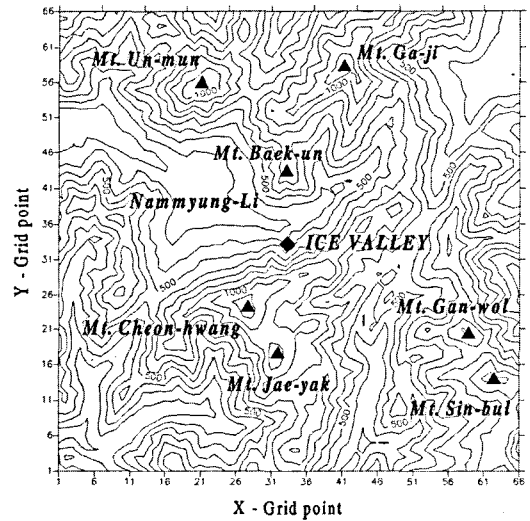
$$H = -\rho C_p u^* \theta^* \quad (10)$$

$$IE = -\rho l u^* q^* \quad (11)$$

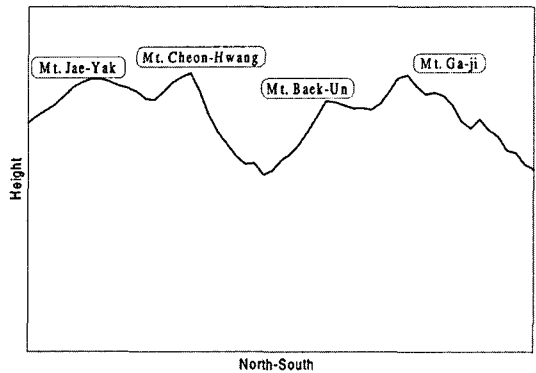
$$\tau = -\rho u^{*2} \quad (12)$$

여기서 u^* , θ^* , q^* 는 각각 마찰속도, 마찰온도, 그리고 마찰비습이며, 난류확산의 계산은 Yamada와 Mellor(1973)의 level 2.5 종결모형을 사용하였다. 상부경계는 모형내부에서 발생하는 중력파의 반사를 방지하기 위하여, Klemp와 Durran(1983)의 파동 경계조건을 사용하였다. 측면경계조건도 같은 이유로 Oranski(1976)의 복사경계조건을 사용하였다. 이 모형은 는 동북지방의 지형성 바람의 메커니즘 규명(Kimura and Kuwagata, 1993), 위성자료 결합 실험(Lee, 1998), 도쿄지방의 토지이용변화에 따른 민감도 평가(Kusaka et al., 2000), 부산지역의 도시화에 관한 연구(이순환 등, 2001) 등에 의하여 모형의 안정성은 검증되었다.

수치모의 실험설계: Fig. 1은 수치모의 실험의 계산 영역과 모형에서 고려한 지형을 나타낸 것으로 대상 지역은 경상남도 밀양시 산내면 남명리 계곡으로 얼음골이 소재한 지점이다. 얼음골(128°59'E, 35°34'N)은 경상남도 밀양의 북부에 낙동강의 지류인 밀양강의 상류에 위치하고 있다. 이는 천황산(해발고도 1,189 m)의 정상으로부터 북서쪽으로 약 1.5 km의 거리이다. 천황산의 남쪽 사면에는 넓이 4.7 km²의 비교적 경사가 작은 고원 지형으로 사자평으로 불리는 지점이다. 얼음골은 천황산의 북쪽 사면을 따라 위치



(a) Horizontal topography



(b) North-South vertical cross-section at grid point x=33

Fig. 1. Topography of computational domain.

하며 유역의 면적은 약 0.6 km²에 이른다. 얼음골은 폭이 약 250 m이며 길이는 약 750 m, 경사는 약 15~20° 정도인 테일러스(Talus) 지형을 가진다. 연구 조사대상지역은 계곡이 동서로 발달해 있는데 남쪽사면에 북향의 얼음골이 위치해 있다. 상북면에서 남명리를 향하여 석남터널을 넘어서면 곧 깊은 계곡이 발달해 있고 서쪽으로 갈수록 계곡은 넓어져서 남명리 부근은 분지의 저면을 형성하고 있다. 이와 같이 이 지역의 지형적 특징은 “V”형 계곡을 이루어 북, 동, 남쪽은 고도 1000 m 정도의 산들로 막혀있고 서쪽이 트여있으며 경사가 대단히 급한 폭이 좁은 분지의 형태를 이루고 있다.

모형에서 고려한 지형의 격자 간격은 200 m이며, 격자의 개수는 66×66×40으로 수평 계산 영역은 13 km×13 km이다.

Table 1. Design of numerical experiments

Case	Condition	Remark
Case 1	without road	Cont. case
Case 2	with road	R-Road
Case 3	with road close to Ice-valley	C-Road

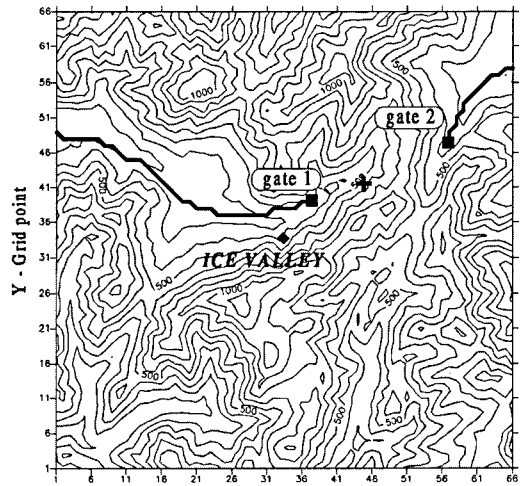
도로 건설에 따른 지표면 알베도 변화와 통행 차량에 의한 인공열 배출이 계곡 내 대기 순환에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3가지 경우를 가정하여 수치 실험을 실시하였다. 수치실험의 개략적인 내용은 Table 1와 같다.

CASE 1은 도로가 없는 경우에 대한 실험으로 계산 영역 전체를 삼림으로 가정하였고, 인공열의 발생은 전혀 고려되지 않았다. CASE 2는 도로가 존재하는 경우에 대한 수치실험으로 Fig. 2(a)와 같은 경로를 따라 아스팔트 도로가 존재하는 것으로 가정하였으며, 도로 상에서는 차량 통행에 의한 발열량을 실험에 고려하였다. CASE 3은 도로의 위치가 계곡 내 대기 순환에 미치는 영향을 파악하기 위하여 도로의 위치를 Fig. 2(b)와 같이 CASE 2보다 남쪽으로 이동한 것이다. CASE 3도 CASE 2와 마찬가지로 도로의 상태는 아스팔트이며, 차량 통행에 의한 인공열의 발생을 고려하였다. 각 실험에서 도로 위치는 Fig. 2에 굵은 실선으로 나타내었고, gate 1과 gate 2는 산을 관통하는 터널을 의미한다.

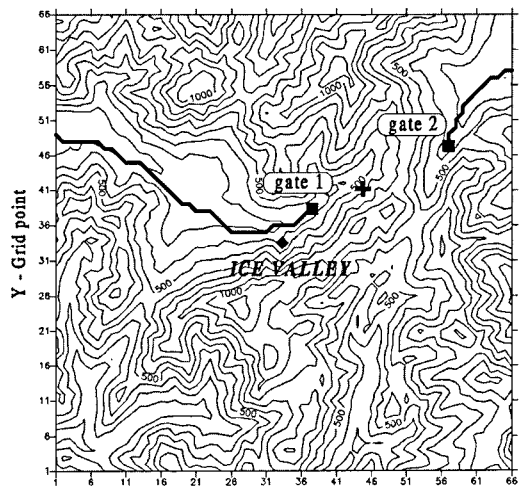
대기의 초기조건은 국지풍의 변화를 보기위하여 중관장의 영향을 배제하였다. 즉 약한 고기압이 존재하는 맑은 날을 가정하였다. 그리고 초기바람은 전층에서 1 m/s의 서풍을 가정하였으며, 초기 온위경도는 0.004 K/m로 약한 대기 안정을 가정하였다. 수치적분은 72시간 실시하였으며, 본 연구에 사용한 해석은 둘째 날의 자료를 이용하였다.

차량 통행으로 인한 도로 상의 인공열 산정

차량 통행으로 인한 발열량 산정에는 Table 2와 3의 도로 통행량, 도로의 길이 차량의 연료 소비율(연비) 등을 이용하였다. 통행량자료는 건설교통부 영향평가서(2001)를 참조하였다. 모델 영역 내에서 도로는 일반 도로 구간과 터널 구간으로 구분될 수 있는데, 일반 도로 구간에서는 균일하게 인공열이 발생하는 것으로 가정한다. 터널 구간 내에서 발생된 열량



(a) CASE 2



(b) CASE 3

Fig. 2. Routes of CASE 2 and 3 (■ : approaches to a tunnel, + : vertical ventilation hole).

을 터널 출입구와 수직 배기구를 통해 배출되는데, 터널 설계에 따라 터널 내 배출량 중 출구 1을 통해서는 44%, 수직 배기구를 통해서는 15%, 출구 2를 통해서 41%가 방출되는 것으로 가정하였다(건설교통부, 2001). 차량 통행량은 주간과 야간의 값으로 구분되며 주간은 오전 7시부터 오후 7시까지이며 이 시간 이외는 모두 야간으로 취급하였다. 실제로는 시간대별로도 차량 통행량에 차이가 있을 것이지만, 본 연구에서는 주간과 야간 각각에서 일정한 차량 통행량을 가정하였다. 터널 출입구와 수직 배기구의 위치

Table 2. Car average fuel economy

Class	Engine displacement (cc)	Combustions rate (km/l)	Consumption per unit Km
Passenger car	800, 1500, 2000, 3000, 4500	12.4	0.0806
Bus	small 2400~2600	16.0	0.0625
	3300~4000		
	mid. 7500~8000	7.2	0.1389
	large 11000 14000		
Truck	small 2300~2600	14.8	0.0676
	mid 3000~3500	11.5	0.0870
	large 11000~16000	6.2	0.1613

Table 3. Predicted traffic density

Class	Passenger car	Bus			Truck			total
		small	midium	large	small	midium	large	
Day	1205	134	55	36	226	174	72	1,902
Night	215	24	10	6	40	31	13	339

Table 4. Estimated anthropogenic heat

	Road (W/m ²)	Gate 1 (J/s)	Ventilation (J/s)	Gate 2 (J/s)
Day	78.17	3.155×10 ⁶	1.075×10 ⁶	2.939×10 ⁶
Night	13.93	5.620×10 ⁵	1.916×10 ⁵	5.237×10 ⁵

는 Fig. 2와 같다. 이에 따라 계산된 인공열 발생은 Table 4와 같다.

결 과

계곡 내 대기의 순환

Fig. 3은 도로가 없는 경우에 대한 수치실험인 CASE 1의 결과 중 모델 최하층인 15m 높이의 수평 바람장을 나타낸 것이다. 서풍을 가정하였으므로 전체적으로는 계산 전 영역에서 서풍이 부는 것으로 나타났는데, 주간에는 계곡 저면에서 산 정상으로 향하는 성분이 잘 발달하였다. 또한 야간의 경우 동쪽을 향한 산의 경사면에서는 서풍 성분과 지표면 냉각에 의한 밀도류의 성분이 같은 방향이 되어 빠른 유속이 나타나지만, 서쪽을 향한 경사면에서는 서풍 성분과 밀도류의 방향이 반대가 되어 유속이 약하게 되거나, 동풍성분이 발견되기도 한다.

Fig. 3(a)는 0300 LST의 수평 바람장을 나타낸 것으로 앞에서 말한 야간의 특성이 잘 나타나고 있다. 먼저 운문산의 동쪽 사면과 백운산 및 가지산의 북쪽 사면에서 형성된 야간 경사류가 결합하여 강한 흐름이 형성되어 있다. 또 가지산의 동쪽 사면에서는

경사류와 서풍이 결합되어 강한 바람이 불고 있는데, 원점에서 북으로 12 km, 동으로 12 km 부근에서 형성된 밀도류가 강하게 수렴하고 있다. 계산 영역의 오른쪽 부분인 간월산, 신불산, 천황산 및 재약산의 동쪽 사면도 강한 흐름이 발견된다. 반면, 이들 산의 서쪽 사면은 흐름이 매우 약하거나 경사류가 형성되어 있다. 이는 종관 흐름에 해당하는 서풍과 경사류의 방향이 반대이기 때문이며, 위치에 따라 약한 동풍이 형성되는 것이다. 특히, 얼음골 앞 계곡의 상류에 해당하는 부분에서는 서풍이 형성되어 있지만, 계곡 하류에서 넓은 평지에서는 동풍 성분의 흐름이 나타나기도 한다. 즉, 남명리의 남서쪽 사면으로부터는 경사류가 종관풍과 결합되어 잘 발달해 있지만, 백운산의 서쪽 사면에 해당하는 남명리의 북동쪽 사면에는 경사류가 크게 형성되어 있지 않다. 또한 천황산과 재약산의 동쪽에서 남북 방향으로 발달한 계곡에서는 천황산 및 재약산에서 발달한 강한 흐름과 간월산과 신불산에서 서쪽을 향해 발달하는 약한 경사류가 수렴하고 있다. 한편, 얼음골 앞에서 남명리까지의 계곡에서는 서풍 성분이 매우 약하게 형성되어 있는데, 이는 얼음골 앞으로 발달한 동서 방향의 계곡 내에 서쪽을 향하는 성분의 힘이 발달해 있음

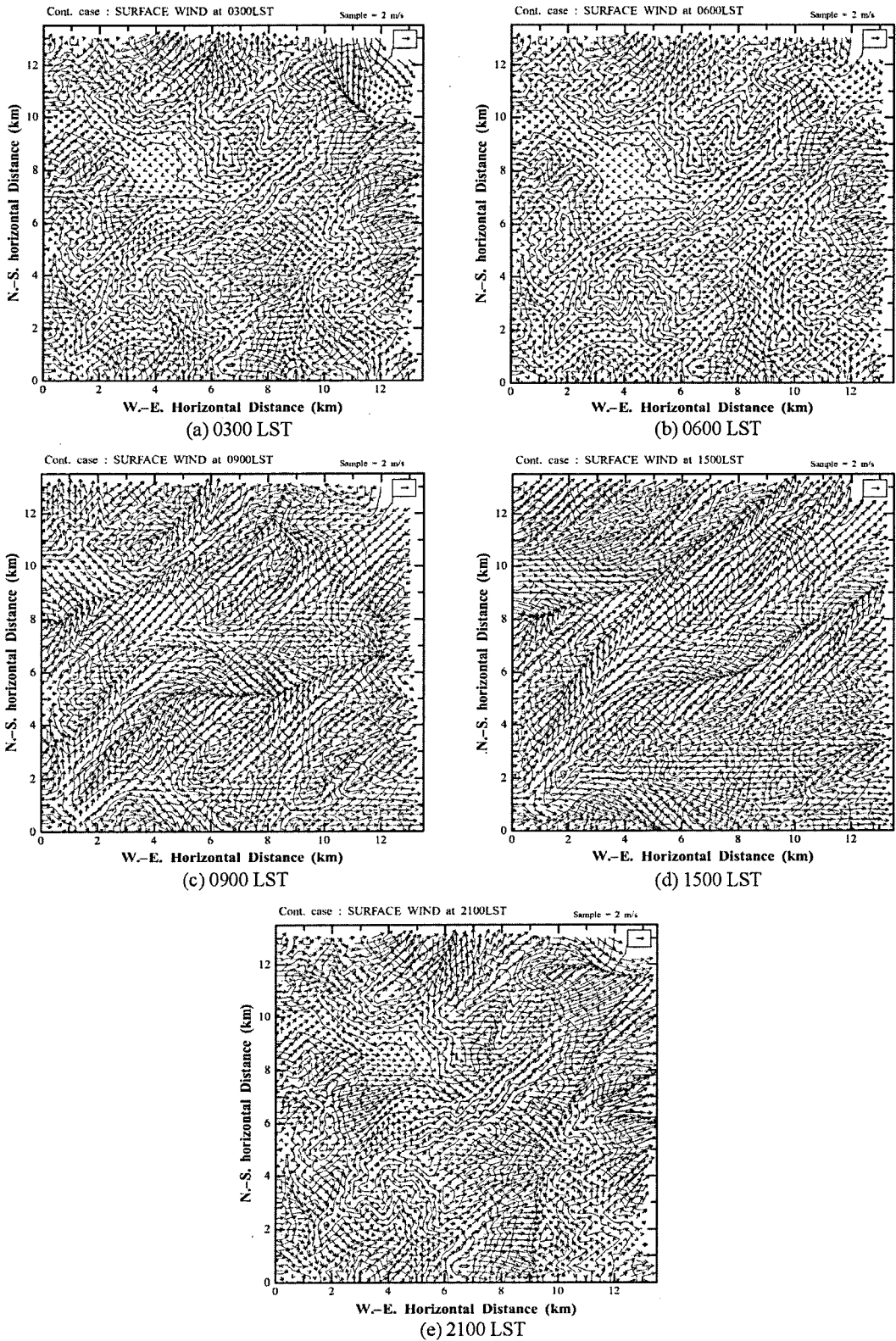


Fig. 3. Simulated surface wind fields of CASE 1 at (a) 0300 LST, (b) 0600 LST, (c) 0900 LST, (d) 1500 LST, (e) 2100 LST.

을 의미한다.

Fig. 3(b)는 0900 LST의 수평 바람장을 나타낸 것인데 지면 가열에 의하여 발달하는 산 정상을 향하는 성분과 서풍이 결합된 양상을 보인다. 따라서 지형의 능선을 따라 수평 바람이 수렴하는 현상이 강하게 나타난다. 산의 서쪽 사면에서는 산 정상을 향하는 흐름이 잘 발달하지만, 산의 동쪽 사면에서는 서풍의 영향으로 산 정상을 향하는 흐름이 우세하게 발달하지는 못한다. 계산 영역 중 가지산의 동쪽과 남동쪽에서는 능선을 향하는 동풍이 발달하였다. 또한 얼음골 앞 계곡에서는 계곡 저면으로부터 계곡 측벽으로 상승하는 흐름이 잘 발달하는 모습이 나타나고 있다.

Fig. 3(c)는 1500 LST의 수평 바람장을 나타낸 것인데, 전 시간에 비해 계산 전 영역에서 서풍이 형성되어 있으며, 능선을 따라 수평 바람이 수렴하는 양상은 유사하다. Fig. 3(d)는 2100 LST의 수평 바람장으로 이전의 야간과 마찬가지로 산의 동쪽 사면에서는 강한 흐름이 발달한 반면 산의 서쪽 사면에서는 약한 흐름이 형성되어 있다. 한편 얼음골 앞의 계곡 하류 중에서 남명리에서는 남쪽 사면에서 발달되어 형성된 흐름이 잘 형성되어 서풍의 풍향을 보인다. 또 백운산에서 형성된 경사류가 얼음골 앞 계곡으로 형성되고 있다. 또 얼음골 앞에서 동서로 발달한 계곡에서는 아직 서쪽에서 동쪽으로 계곡을 따라 올라가는 흐름이 강하게 형성되어 있다. 계곡 축에 수직인 계곡 측벽에서 경사류를 형성하는 힘이 계곡 축에 나란한 방향으로 부는 산풍을 형성하는 힘보다 빠른 시간에 발달함을 간접적으로 나타낸다고 할 수 있다.

Fig. 4는 얼음골이 위치한 6 km 지점의 남북 단면에 대한 바람장이다. 그림 중앙의 계곡이 얼음골 앞에서 동서로 발달한 계곡의 저면이며, 왼쪽이 얼음골의 남쪽에 위치한 산계로 남쪽의 두 봉우리가 각각 재약산과 천황산에 해당하고, 오른쪽이 백운산과 가지산이다.

Fig. 4(a)는 0300 LST의 연직 단면으로 가지산의 북쪽 사면은 경사류가 잘 형성되어 있다. 계산 영역 중앙 계곡에서는 명확하지는 않지만, 계곡 측벽의 지표면 부근에서는 약한 하강류가 형성되어 있고 계곡 중앙부에 상승기류가 분포하는 영역이 넓게 나타난다. Fig. 4(b)는 0900 LST의 연직 단면으로 그림의 오른쪽 부분, 즉 가지산의 북쪽 사면에서는 가지산

정상으로 향하는 흐름이 형성되어 있지 않은데, 전체적인 주풍의 방향이 남서쪽에서 북서로 움직이고 있으며, 전체적인 지형분포에 의해서 산과 평행하게 흐르는 바람에 의해서 곡풍형성이 저지된 결과로 보인다. 또 그림 중앙 계곡의 양 측면에서는 모두 상승기류가 형성되기 시작하는데, 이 시각이 오전으로 태양의 위치가 동쪽이므로 양쪽 사면 모두 태양복사를 받을 수 있기 때문에 이러한 양상이 나타날 수 있다.

얼음골의 지상바람장분포에서 보았듯이 매우 복잡한 양상의 바람장을 나타내고 있다. 그러므로 매우 복잡한 형태의 연직 바람장이 나타날 것으로 보인다. 본연구의 경우 얼음골의 얼음형성과 관련된 기상장형태에 관심을 가지고 있으므로, 얼음이 생성되는 위치의 단면도를 통해 연직바람장의 변화를 보았다.

Fig. 4(c)는 1200 LST의 남북 연직 바람장인데, 천황산의 북쪽 사면의 하강류와 백운산의 남쪽 사면의 강한 상승류가 특징적으로 발달하였다. 이것은 남서와 북동으로 뻗는 지형의 영향이 나타나고 있다. 이것은 남서쪽이 트여진 지형에서 형성된 곡풍이 상대적으로 단혀진 지형을 형성하는 북동방향으로 바람이 들어가면서 상승이 발생한다. 그리고 천황산은 북쪽 사면은 상대적으로 긴 이동거리를 움직이면서 약간 하강하는 경향을 나타낸다. 이것이 단면도상에서 하강류로 나타나는 원인으로 볼 수 있다. 그리고 본연구의 계절이 봄이기 때문에 얼음골이 위치해 있는 천황산의 북쪽 사면의 경우, 북쪽을 향한 지형으로 상대적으로 태양복사를 충분히 받지 못하는 반면, 백운산의 남쪽 사면은 상대적으로 강한 일사도 영향을 미친다고 볼 수 있다. Fig. 4(d)는 1800 LST의 연직 단면인데, 앞 시간에 비해 천황산의 북쪽 사면은 하강 기류가 유지되고 있으나, 백운산 쪽의 상승기류는 거의 소멸된 상태로 볼 수 있다. 야간의 계산 결과는 Fig. 4(a)와 비슷한 양상을 보여준다. 이처럼 특정단면의 연직바람장은 이지역이 매우 복잡한 양상의 바람장이 나타나기 때문에 대표성을 가지고 있다고 결론짓기에는 어려움이 있으나, 관심지역의 바람장의 변화는 잘 나타나고 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 지점의 남북 연직 단면 등온위선도인데, Fig. 5(a)는 0300 LST의 값을 나타낸 것이다. 그림 중앙 부분에서 계곡 중심부의 온위는 계곡 측벽에서보다 낮은 값을 보인다. 이는 계곡 측벽의 지표면 부근 온위값이 계곡 중심의 같은 고도에서의 온위보다 낮음을 나타내는데, 경사면으로 따

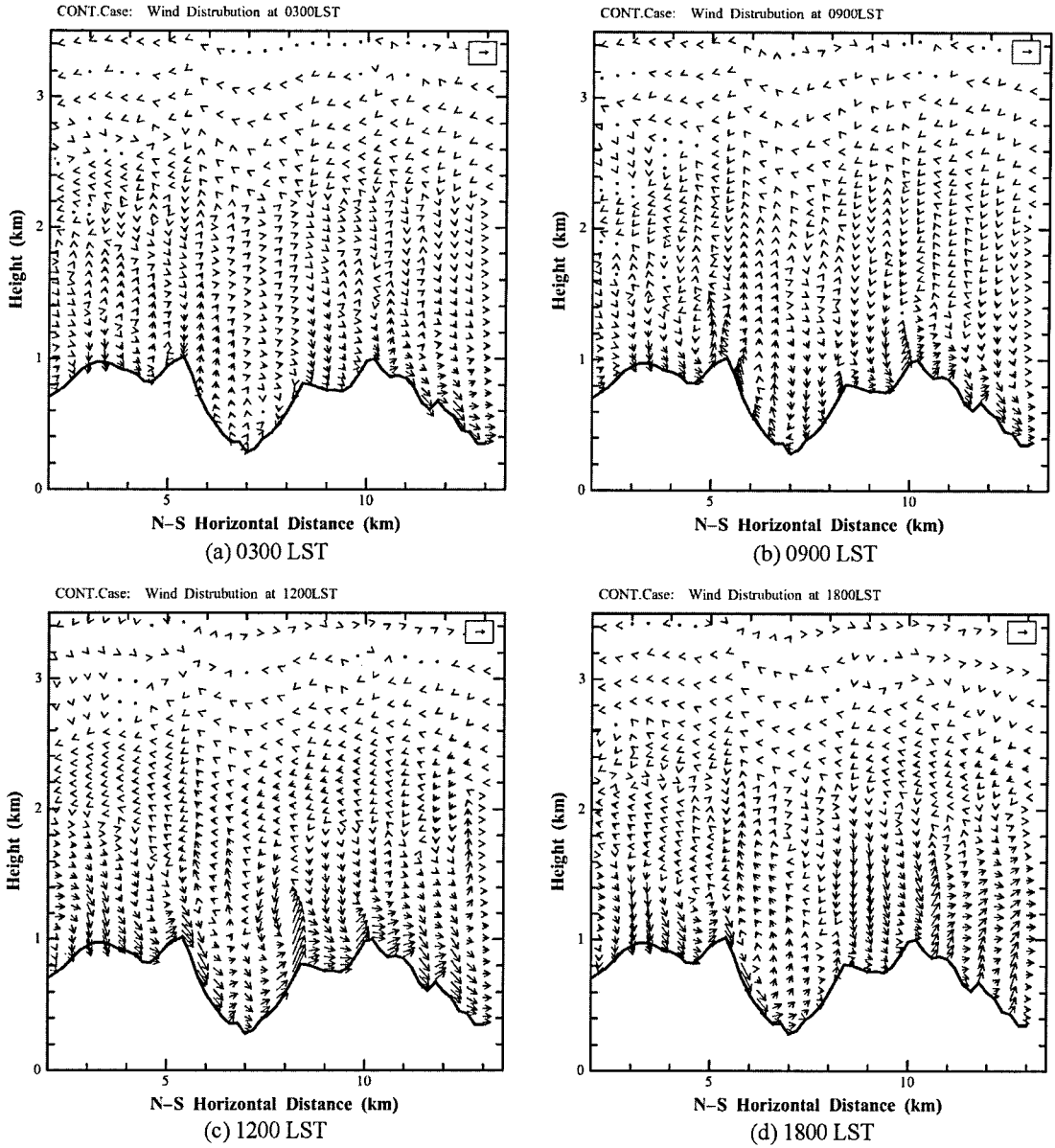


Fig. 4. Vertical cross sections of wind fields for CASE 1 in the north-south direction through $x = 33$ grid point at (a) 0300 LST, (b) 0900 LST, (c) 1200 LST, (d) 1800 LST.

라 하강류가 형성되어 있음을 나타낸다. Fig. 5(b)는 1500 LST의 모습을 나타낸 것이다. 중앙계곡에서는 계곡 저면을 중심으로 비대칭적인 등온위선이 발견된다. 가지산과 백운산의 남쪽 사면에서의 온위가 천황산의 북쪽 사면에서보다 높은 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 4에서 본 것과 같이 계곡 내에서 천황산의 사면에서는 하강류가 형성되는 반면, 백운산의 사면에서는 상승류가 발달하는 것과 일치한

다. Fig. 5(c)는 1800 LST의 온위를 나타낸 것인데, 천황산의 북쪽 사면 부근에 등온위선이 심하게 굴곡되어 있으며, 이는 이 시각까지 잔존하고 있는 하강류의 존재와 관계있는 것으로 보인다.

수치 실험의 결과를 볼 때, 야간에는 계곡 내에서 산의 경사면을 따라 하강하는 흐름이 발달하는데 수치실험에서 가정한 서풍의 영향으로 산의 동쪽 사면은 강한 흐름이 발달하고, 산의 서쪽 사면은 두 성분

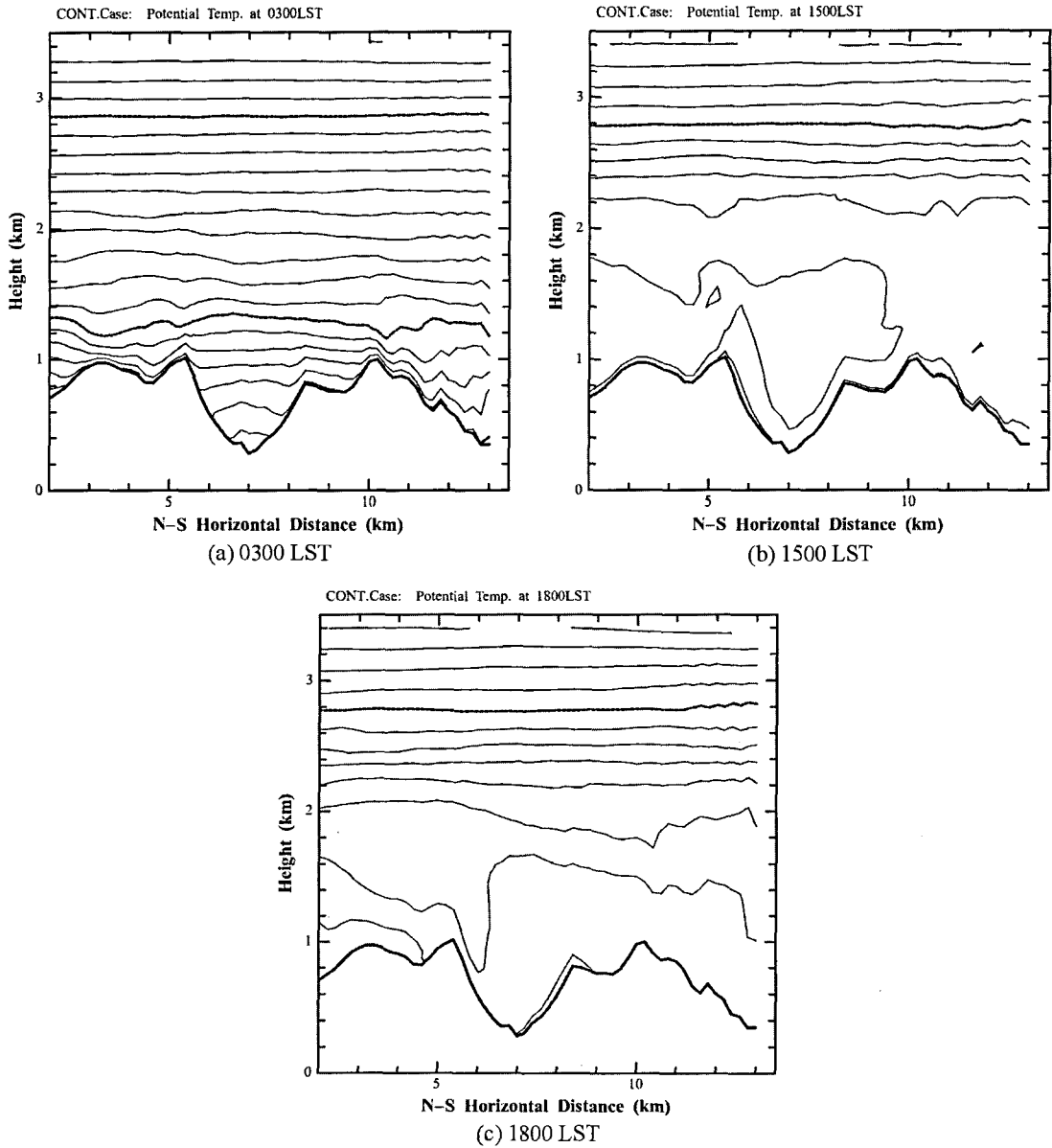


Fig. 5. Vertical cross section of the potential temperature fields for CASE 1 in the north-south direction through $x = 33$ grid point at (a) 0300 LST, (b) 1500 LST, (c) 1800 LST.

이 상쇄되어 약한 풍속이 나타났다. 주간에는 서풍과 산의 경사면을 따라 상승하는 흐름이 결합된 형태의 순환이 나타난다. 그 결과 산의 정상부에서 강한 수렴이 나타났다. 이는 동서로 뻗어있는 얼음골의 서쪽 부분이 상대적으로 평지가 넓고 동쪽방향이 상대적으로 협소하기 때문에 지표면 에너지수지에 의해서 서에서 동으로 부는 곡풍의 형태가 강화된다. 그리고

얼음골 앞에서 동서로 발달한 계곡에서는 백운산의 남쪽 사면이 천황산의 북쪽 사면보다 상대적으로 많은 일사를 받게 되어 천황산의 북쪽 사면에서는 하강기류가, 백운산의 남쪽 사면에서는 상승기류가 발달하였다. 1800 LST 경에는 백운산의 남쪽 사면에서는 상승기류가 약화되지만, 천황산의 북쪽 사면에서는 아직 하강기류가 유지되고 있다.

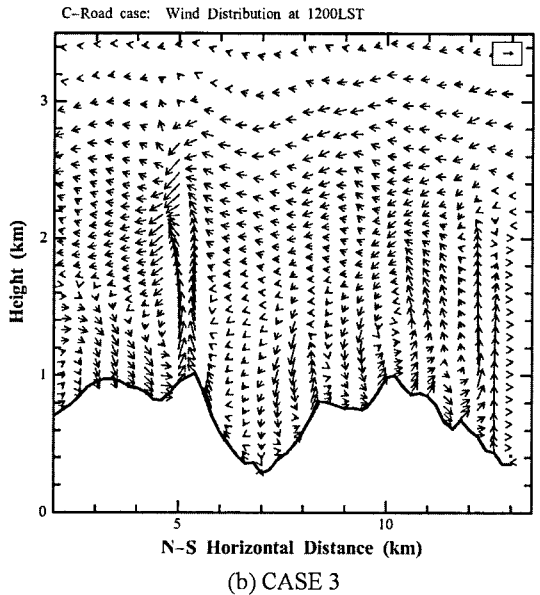
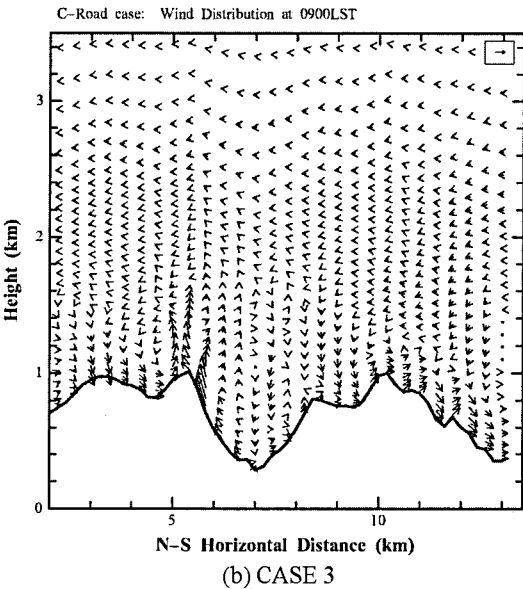
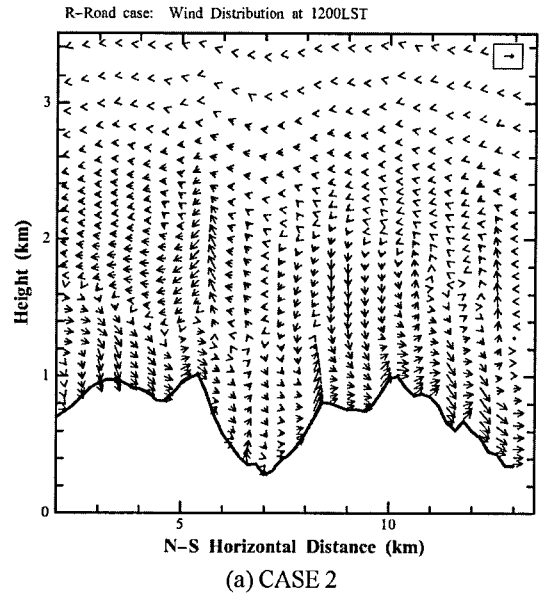
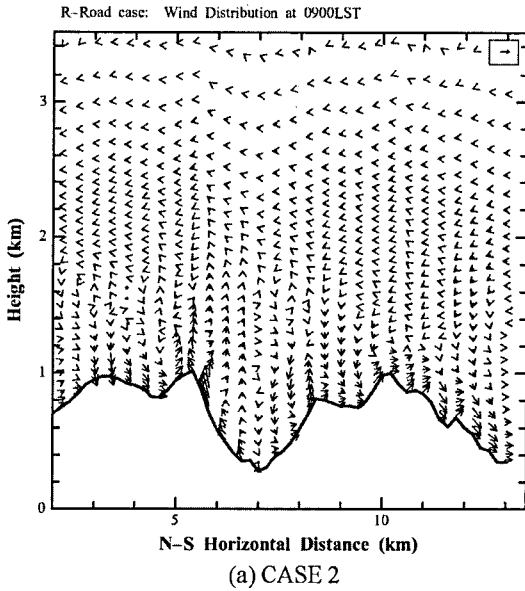


Fig. 6. Vertical cross section of the wind fields at 0900 LST for (a) CASE 2 and (b) CASE 3.

Fig. 7. Same as Fig. 6. except for 1200 LST.

계곡 순환에 미치는 도로와 인공열의 영향

Fig. 6은 CASE 2와 3에 대한 0900 LST의 연직풍속 단면이다. CASE 2는 도로의 위치가 백운산 쪽으로 치우쳐 있으며, CASE 3은 CASE 2보다는 천황산에 가깝다. Fig. 6(a)는 CASE 2의 결과인데, CASE 1과는 큰 차이가 보이지 않는다. 이 시간대에는 CASE 1의 경우에도 백운산쪽 사면에 상승기류가 존재하는데, CASE 2에서 백운산쪽에 반사율이 작은

도로가 존재하기 때문에 CASE 1의 순환을 방해하는 힘이 작용하지 않기 때문으로 보인다. 반면, Fig. 6(b)는 CASE 3의 결과를 나타낸 것인데, 백운산쪽 사면에는 CASE 1이나 2에 비해 현저히 약한 상승기류만이 존재할 뿐이다. CASE 3이 CASE 2에 비해 천황산 쪽에 가까운 곳에 도로가 존재하는데, 이는 백운산 사면에 상승기류가 발달하는데 장애가 되기 때문으로 보인다.

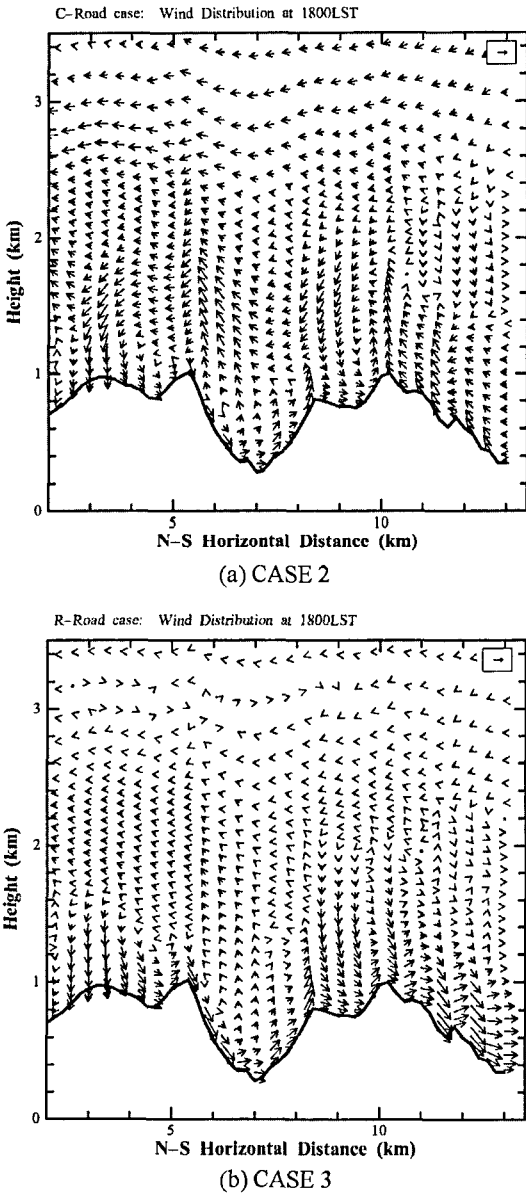


Fig. 8. Same as Fig. 6. except for 1800 LST.

Fig. 7(a)와 (b)는 CASE 2와 CASE 3에 대한 1200 LST의 연직 풍속 단면이다. Fig. 7(a)에서 볼 때, CASE 1에 비해 CASE 2의 결과는 천황산 쪽 사면에서 하강기류가 훨씬 약하고, 계곡 저면 중심에서 상승기류가 형성되어 있다. Fig. 7(b)의 CASE 3의 결과는 CASE 1과 2와는 전혀 다른 양상이 나타나는데, CASE 1에서는 하강 기류가 발달하였던 천황산쪽 사면에서 오히려 상승기류가 형성되어 있다. CASE 3에서는 CASE 2보다 도로의 위치가 천황산

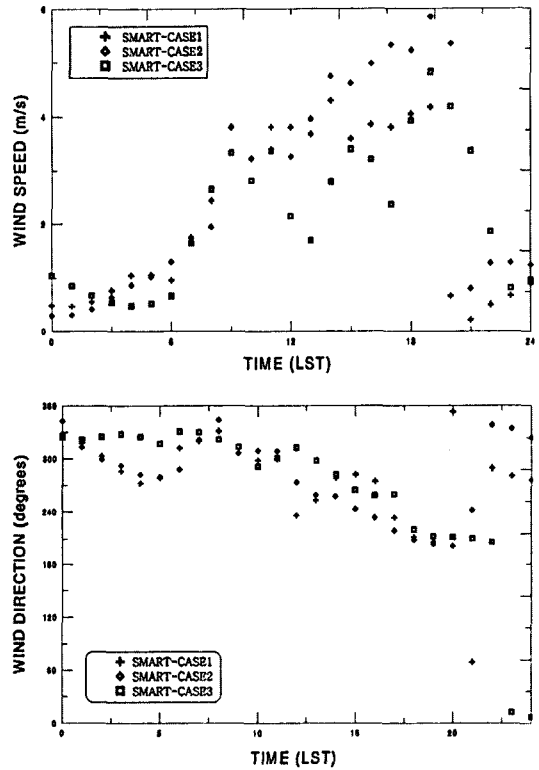


Fig. 9. Diurnal variation of wind speed and direction at frozen area in Ice valley.

쪽에 더 가까운데, 이로 인하여 상승류가 형성된 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 8은 CASE 2와 CASE 3에 대한 1800 LST의 연직 풍속 단면이다. Fig. 4의 CASE 1이 결과에서 1800 LST까지 천황산 쪽 사면에서 하강기류가 형성된 것을 볼 수 있었다. Fig. 8(a)의 CASE 2에서는 천황산 쪽 사면에서 하강기류가 여전히 유지되고 있다. 또한 맞은편의 백운산 쪽 사면에서는 CASE 1보다 강한 상승기류가 형성된 것을 볼 수 있는데, 백운산 쪽 경사면에 존재하는 도로의 영향으로 볼 수 있다. Fig. 8(b)의 CASE 3에서는 CASE 1에 비해 천황산 쪽 사면의 하강기류가 훨씬 약하게 형성되어 있고, 백운산 쪽 사면에서는 CASE 2에 비해 훨씬 약한 상승기류가 형성되어 있다.

한편 야간의 실험결과는 그림으로 나타내지는 않았지만, CASE 2와 3모두 CASE 1과 큰 차이를 나타내지 않았다. 주간에는 지표면의 알베도 변화가 단과 복사의 흡수율을 변화시켜 대기 순환에 변화가 일어나지만 일몰 이후로는 단과 복사가 없으므로 큰 변

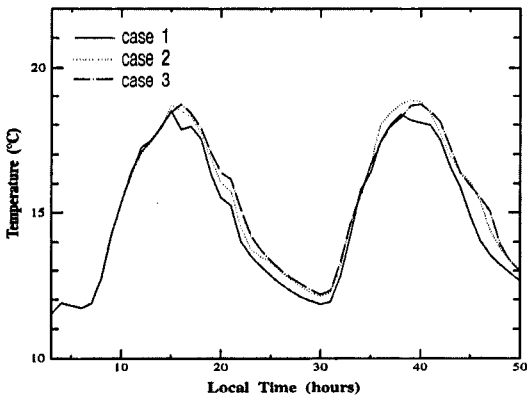


Fig. 10. Diurnal variation of surface air temperature at frozen area in Ice valley.

화가 없는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 9는 얼음골 결빙지역에서의 풍속 및 풍향의 변화를 나타낸 것이다. Case 2의 경우, 도로가 없는 경우에 비하여 풍속이 한밤에서 새벽까지 감소하고, 오후에는 증가하는 것으로 나타났다. 이에 비하여 case 3의 경우는 저녁에서 한밤까지는 풍속이 증가하고, 한낮에는 오히려 풍속이 감소하는 것으로 나타났다. case 2와 case 3 모두 풍속 증가량이 가장 큰 때는 저녁 8시이고, 증가량은 각각 4.67 m/s와 3.51 m/s였다. 이때를 제외한 경우의 증가량은 2 m/s 미만이며, 풍속이 작아지는 경우에도 감소량은 2 m/s를 넘지 않는다. 풍향의 경우, 도로의 유무에 따른 차이가 그리 크지 않음을 볼 수 있다.

이러한 순환장의 변화로 인한 얼음골의 기온의 일 변화를 나타낸 것이 Fig. 10이다. 주간의 경우 세 경우 모두 비슷한 온도 상승률을 가지고 증가하며, 큰 차이가 나타나고 있지 않다. 그러나 야간의 경우 각각 차이가 나타남을 볼 수 있다. 도로가 얼음골에 가까운 case 3에서 가장 높은 온도의 상승률을 나타낸다. 그리고 이들의 차이는 시간이 지남에 따라 작지만 약하게 증가하는 경향을 나타낸다. 이것은 도시화의 영향이 주간의 경우 강한 태양의 단파복사의 영향으로 가시적으로는 나타나고 있지 않지만, 야간의 경우, 도로 교통 및 아스팔트 등에 의한 도로 인공열이 약한 지구 장파복사속에서 가시적으로 크게 부각되어 나타난다. 그러므로 야간에 각 실험의 얼음골 결빙지역의 온도차이 나타난다고 볼 수 있다.

실험들의 온도차를 자세히 보기위하여 실험 상호간의 온도차를 나타낸 것이 Fig. 11이다. Fig. 10에서와

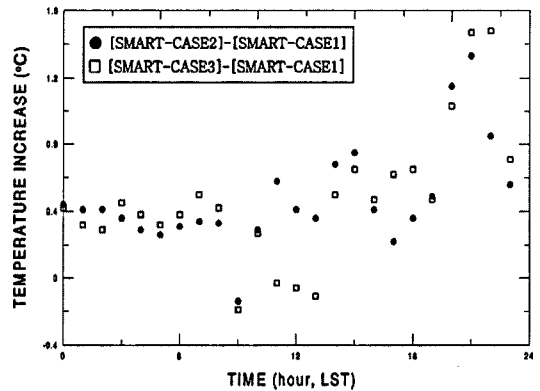


Fig. 11. Difference of surface temperature calculated by numerical experiments.

마찬가지로 도로가 존재하는 Case2, Case 3 모두 도로가 없는 경우에 비하여 온도가 증가하는 경향을 나타지 내고 있다. 그리고 도로가 없는 Case1에 대한 기온 상승량은 Case2의 경우 최대 1.3°C, Case 3에서 최대 1.5°C 정도로 도로위치에 따른 차이는 크게 나타나지 않고 있다.

결론

약한 종관풍이 부는 경우에 대하여 계곡 내 대기 순환과 도로 건설에 따른 지표면 변화와 통행 차량에 의한 인공열 배출량의 영향을 파악하기 위하여 3차원 대기순환 모형을 이용한 수치모의 실험을 수행하였다. 수치 모의실험은 산의 방향 출구에서 도로가 없는 경우, 실제 도로가 건설될 경우, 실제 도로를 보다 얼음골 쪽으로 근접시킨 경우의 3가지에 대하여 실시하였다. 도로의 영향을 고려하는 경우에 대해서는 도로 경로를 따라 지표면 변화와 도로 상에서 차량 통행에 의한 발열량을 고려하였다. 수치모의 실험에서는 이 지방의 탁월풍인 서풍이 부는 경우를 가정하였다.

산악지역 내에서 약한 종관풍이 불 때 야간의 경우 종관풍의 방향과 일치하는 경사면에서는 경사류가 잘 발달하는 반면, 종관풍의 방향과 반대 방향의 사면에서는 경사면 아래로 형성되는 경사류와 종관풍이 상쇄되어 약한 풍속 분포가 나타났다. 주간의 경우는 영역 내의 바람장 분포는 대체로 종관풍과 곡풍이 결합되어 산 정상부면에서 강한 수렴이 발견된다. 또한 동서로 발달한 계곡에서 주간에는 남쪽을 향하는

사면에서는 강한 상승류가 형성되는 반면, 북쪽을 향한 사면은 일사를 강하게 받지 못하여 오히려 하강류가 형성되었다. 따라서 동서로 발달한 계곡에서는 주간에는 계곡의 양쪽 사면에서 모두 상승류가 발달하는 것이 아니라 비대칭적인 형태의 순환이 형성될 수 있다. 한편 북쪽을 향한 사면에서 주간에 형성되었던 하강기류는 1800 LST 이후까지도 지속되는 양상을 보여주었다.

수치 실험의 결과로 볼 때 도로포장으로 인한 지표면 변화와 차량에 의한 인공열 배출은 계곡 내 국지 순환장에 영향을 주고 있다. 도로 건설에 따른 대기 순환의 변화 양상이 야간에는 크지 않았는데, 이는 도로가 야간에는 단파복사가 없기 때문이다. 이때 교통량 증가에 의한 인공열의 영향은 작은 것으로 나타났다. 반면 주간에는 도로의 위치에 따라 상이한 순환 형태가 나타났다. 도로의 위치가 동서 방향의 계곡 내에서 남향의 북쪽 사면에 가까이 위치할 때는 도로가 없는 경우에도 형성되는 상승류와 도로의 영향으로 인한 상승류가 결합되어 도로가 없는 경우보다 강한 상승기류가 형성되지만, 전체적인 순환 모습에는 큰 변화가 없다. 하지만 도로가 북향의 남쪽 사면에 더 가까이 위치할 때는 알베도 감소와 인공열 배출의 영향으로 북향의 사면에서 하강기류가 형성되지 않는 모습이 나타났다.

본 연구의 경우 매우 제한된 조건에서 실시하였으므로, 종관장의 상태 및 대기의 초기조건 등에 의한 순환장이 매우 복잡하게 전개 될 수가 있으며, 전체적인 정성적인 형태의 순환장 변화를 나타낸 것이다. 그러므로 정량적인 변화를 보기 위해서는 3차원적인 동화자료를 이용하여, 주변지역과의 이류 등을 고려할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 하나인 “국지기상예측기술개발 과제”에서 수행된 것입니다.

참고문헌

1. 건설교통부, 2001, 산외-상북간 (능동터널) 국토확장공사환경영향평가서, 859 p.
2. 문승의, 황수진, 1977, 한국 밀양 얼음골의 하계결빙현상에 관하여, 부산대학교사범대학 자연과학연구소논문집,

- 4, 47-57.
3. 이순환, 이화운, 김유근, 2002, 복잡지형에서 도시화에 따른 대기확산에 관한 수치시뮬레이션, 한국대기환경학회지, 18 (2), 67-83.
4. 이주호, 현재민, 송태호, 1994, 복사가열되는 적층원판의 비정상 열전달해석, 대한기계학회지, 18 (1), 156-165.
5. Deardorff, J.W., 1978, Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer vegetation, *Journal of Geophysical Research*, 83, 1889-1903.
6. Kikuchi, Y., Arakawa, S., Kimura, F., Shirasaki, K., and Nagano, Y., 1983, Numerical study on the effects of on the land and sea breeze circulation in the Kanto district. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 59, 723-738.
7. Kimura, F. and Arakawa S., 1983, A numerical experiment of the nocturnal low level jet over Kanto plain, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 61, 848-861.
8. Kimura, F. and Takahashi, S., 1991, the effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerica experiment, *Atmospheric Environment*, 25B, 155-164.
9. Kimura, F. and Kuwagata, T., 1993, ‘Thermally Induced Wind Passing from Plain to Basin over a Mountain Range’, *Journal of Applied Meteorology*, 23, 1538-1547.
10. Klemp, J.B. and Durran, D.R., 1983, An upper boundary conditions permitting internal gravity wave radiation in numerical mesoscale models. *Monthly Weather Review*, 11, 430-440.
11. Kondo, J., Nakamura, T., and Yamazaki, T., 1991, Estimation of the solar and downward atmospheric radiation. *Tenki*, 38, 41-48.
12. Kusaka, H., Kimura, F., Hirakuchi, H., and Mizutori, M., 2000, The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in Tokyo Metropolitan area. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 78, 405-420.
13. Lee, S-H., 1998, Numerical studies on the impacts of topography and heterogeneous surface moisture estimated by satellite data on the local circulation. Unpublished Ph. D. Dissertation, University of Tsukuba, Tsukba, Japan.
14. Lee, S-H. and Kimura, F., 2001, Comparative studies in the local circulation induced by land-use and by topography. *Boundary Layer Meteorology*, 101, 157-182.
15. Mellor, G.L. and Yamada, T., 1974, A hierarchy of turbulence closure models of planetary boundary layers. *Journal of Atmospheric Science*, 31, 1791-1805.
16. Orlanski, I., 1976, A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *Journal of Computatinal*

Physics, 21, 251-269.

17. Song, T-H., 1994, Numerical simulation of seasonal convection in an inclined talus, Proceedings of the 10th Int'l Heat Transfer Conference, 2, 455-460.
18. Tanaka, H.L., Nohara, D., and Yokoi, M., 2000, Numerical simulation of wind hole circulation and sum-

mer-time ice formation at Ice Valley in Korea and Nakayama in Fukushima, Japan. Journal of Meteorological Society of Japan, 78, 611-630.

19. Yoshikado, H. and Kondo, H., 1989, Inland penetration of the sea breeze over the suburban area of Tokyo, Boundary Layer Meteorology, 48, 389-407.

2003년 10월 24일 원고 접수
2004년 1월 6일 수정원고 접수
2004년 1월 17일 원고 채택