

미기상규모 영역의 온실기체 승온효과에 관한 수치연구 Numerical Study on Warming Effect Due to Green House Gas in Microscale Atmospheric Domain

이순환* · 서광수¹⁾ · 김동희²⁾ · 황수진¹⁾

조선대학교 아시아몬순, 기후환경연구센터

¹⁾부산대학교 지구과학교육과

²⁾부산과학영재학교

(2003년 9월 8일 접수, 2004년 4월 16일 채택)

Soon-Hwan Lee, Kwang-Soo Seo¹⁾, Dong-Hee Kim²⁾ and Soo-Jin Hwang¹⁾

Center for Asia Monsoon & Climate Environment Research, Chosun university.

¹⁾*Busan National University, Department of earth science education*

²⁾*Busan Science Academy*

(Received 8 September 2003, accepted 16 April 2004)

Abstract

The change of land use such as the construction of way in mountainous area and tunnel leads to the quantitative change of the greenhouse gas. This study tried to clarify the effect of the change of land use around Miryang Ice Valley on thermal environment of micro-meteorological scale by numerical experiment. We carried out several numerical experiment under different atmospheric conditions with different amount of greenhouse gases. Heating rate increased by the greenhouse gas in the ground level is average of 0.0073 K/day. And the increasing rate is smaller than the daily average heat crossing quantity.

Key words : Green house gases, Numeric model, Ice Valley, Global warming, CRM.

1. 서 론

현재 세계적인 이상 고온 현상이나 그 밖의 기후 변동의 원인으로 지구 온난화와 그에 따른 대기중 온실기체의 역할에 대한 관심이 고조되고 있다. 또한 이러한 문제의 원인이 산업 경제의 발달과 밀접한 관련이 있다는 연구 결과는 각 국가들의 경제 성장

과 산업 발달에 많은 영향력을 끼치게 되었다.

세계기상기구(WMO)는 대기 중의 온실기체 및 이와 관련된 기체들에 대한 체계적이고 신뢰할 만한 관측 자료를 생산하기 위해 1989년부터 기존에 실시해 왔던 전구 오존 관측시스템(GO₃OS, Global Ozone Observing System)과 배경대기오염 관측시스템(BAPMoN, Background Air Pollution Monitoring Network)을 통합한 지구대기 감시 프로그램(GAW, Global Atmosphere Watch)을 시작하여 전 지구적인 대기 성분 감시 및 분석 기술의 향상과 관측 자료의

* Corresponding author

Tel : +82-(0)62-230-7714, E-mail : leesh@chosun.ac.kr

공유를 주도해 오고 있다.

수치실험에 의한 연구 역시 지구온난화 관점에서 많은 연구가 수행되어져 왔다. 온실기체 영향 연구와 기후 변화에 대한 모델링 연구는 거의 대부분이 지구규모의 GCM(Global Circulation Model)단위가 일반적이며, 이산화탄소에 기인된 기후 변동의 크기를 정확히 묘사하는 데는 모형의 불완전성, 모형 시그널과 자연 변동의 불확실성 및 속성 문제 등이 현실적 과제로 남아있다(Santer *et al.*, 1993). 또한 이산화탄소의 점증에 따른 지표 기온의 강제 변동을 정확하게 이해하기 위해서는 대기 복사 과정과 기후계의 복합적 시스템의 상호 과정에 대한 정확한 분석이 요구되고 있다(하경자 등, 1997). 그러나, 여전히 온실기체의 측정과 그 영향에 관한 연구는 대규모나 중규모 이상의 지역에 한정되어 미규모나 중규모의 지역 내에서의 온실효과에 대한 연구는 제한적이다.

그러나 산업화과정에서 교통수단의 확대와 더불어 미규모, 중규모적인 도시화에 의한 지역대기의 승온 현상은 중규모 또는 미규모 기상현상의 변화를 가져온다(이순환 등, 2002). 그리고 산악지역에서의 도시화는 국지순환장에 영향을 미치며, 산곡풍을 약화시키는 효과를 가져온다(Lee and Kimura, 2001). 우리나라 국토의 70%가 산지로 되어있음을 감안하면, 산업 발달에 따른 수송 관계에서부터 관광산업의 일환으로 도로 건설의 확충과 복잡한 지형을 관통하는 터널 공사가 불가피한 실정이다. 이러한 도로 및 터널확충에 따른 영향은 산악지역의 폐쇄성에 의하여 더욱 크게 나타난다. 따라서 터널 공사의 경우 다음과 같은 두 가지 특징을 가지게 된다.

첫째, 터널 공사가 필요한 지역은 우회 도로 건설이 불가능한 지형으로 주위에 높은 산들이 둘러싸여 있는 경우가 대부분이다. 또한 이러한 산들은 계곡이나 분지 지형을 형성하여 기류가 산곡풍(mountain-valley wind)과 같이 지형적인 영향을 강하게 받는 순환이 잘 나타나며, 독특한 폐쇄 순환계나 강한 역전층을 형성하여 오염물질이나 그 밖의 물질들이 폐쇄 순환계에 의해 외부와 단절된 가능성을 보인다(이순환 등, 2004).

둘째, 터널이 완공될 경우 공사 지역에는 공사 이전보다 교통량이 증가하게 된다. 이는 터널을 통한 배출 가스와 발생열량, 연소 생성물의 증가를 의미한다. 이 중 특히 대표적인 온실기체인 이산화탄소, 메

탄, 수증기, 질소산화물과 오존 등의 발생과 연소 중 발열량은 터널 건설 지역의 승온 효과에 영향을 미친다. 또한 이러한 지역적인 온실기체의 증가 이외에도 전지구적인 온실기체는 그 양이 매년 증가하는 추세에 있음을 알 수 있는데, 이러한 원인들의 영향을 예측하고 이해하는 것은 생태계의 보존, 농업 활동을 위한 자료가 되리라 생각된다.

그러나 이러한 관광지의 교통확충에 따른 관광산업의 발달은 국지기상의 변화를 가져올 가능성이 고려되어진다. 특히 독특한 기상 현상이 관광자원의 핵심이 되는 지역에서 지표면 환경변화에 따른 국지기상의 변화는 반드시 고려되어야 할 점이다. 이러한 관점에 기상현상이 고려되어야 할 관광자원의 하나로써 밀양의 얼음골이 여기에 속한다.

얼음골에서는 하계 고온의 기온상태에서 암반주위에 얼음이 형성되고, 겨울이 되면서 얼음이 사라지는 특이한 기상현상이 발생한다. 이러한 기상현상은 겨울과 여름의 기온변화에 매우 민감하게 반응한다. 그러므로 관광자원의 보존과 관련하여 도시화에 의한 승온현상을 파악하는 것이 중요하다.

기존 온실기체의 연구의 대부분이 지구온난화 관점에서 이루어져왔다. 그리고 미기상학적인 관점에서의 연구가 매우 미진하다. 이는 온실기체의 생존 및 대기에 영향을 미치는 시간이 매우 길다는 관점에서 미기상학적인 영향이 미미한 것으로 파악하고 있기 때문이다. 이러한 온실기체가 국지기상에 미치는 영향을 정성적으로 파악하는데 그치고 있다. 그러나 얼음골과 같은 국지적인 지역에서의 교통발달에 의한 생성되는 온실기체의 정량적인 영향력을 파악하여 국지적인 환경변화를 연구하는 것도 매우 중요하다.

이에 본 연구에서는 관측을 통해 밀양시 산내면 지역의 기상학적 특성을 파악하고, 터널 개통시 증가할 교통량에 따른 온실기체의 농도 변화와 연간 배경농도의 변화를 고려한 복사수지 모형실험을 실시하였다. 그리고 폐쇄적인 얼음골지역의 일중 기온변화에 온실기체가 미치는 승온률을 정량적으로 비교 예측하고자한다.

2. 연구대상지역 및 지역 기상장

대상 지역은 경상남도 밀양시 산내면 남명리 계곡

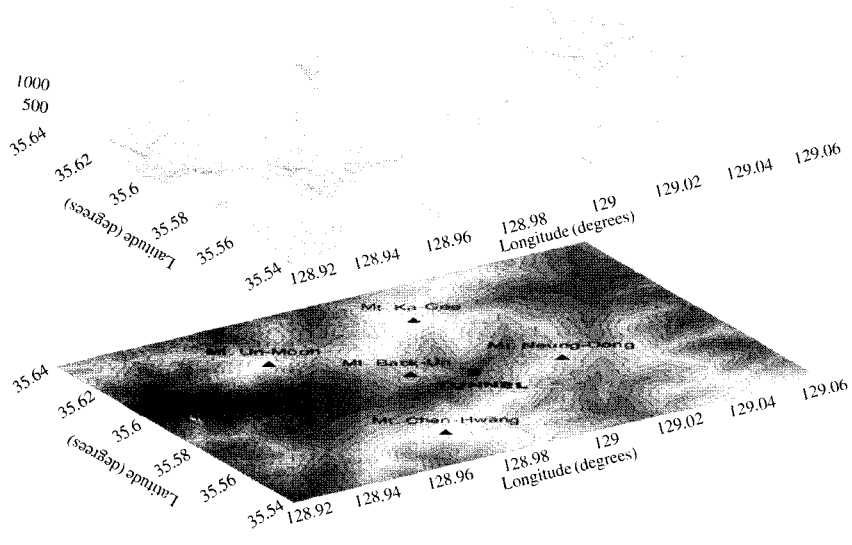


Fig. 1. Geographical map of target area. Contours interval is 100 m.

으로 얼음골이 소재한 지점이다. 얼음골(128° 59'E, 35° 34'N)은 경상남도 밀양의 북부에 낙동강의 지류인 밀양강의 상류에 위치하고 있다. 얼음골은 4월부터 8월까지 결빙이 발생하는 기이한 현상으로 천연기념물 224호로 지정되어 있다. 얼음골 주변지형은 그림 1에 나타나있다. 얼음골은 천황산(해발고도 1,189 m)의 정상으로부터 북서쪽으로 약 1.5 km의 거리에 있다. 천황산의 남쪽 사면에는 넓이 4.7 km²의 비교적 경사가 작은 고원 지형으로 사자평으로 불리는 지점이다. 얼음골은 천황산의 북쪽 사면을 따라 위치하며 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. 연구조사대상지역은 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 1,000 m 정도의 산들로 막혀 있고 서쪽이 트여있으며 경사가 대단히 급한 폭이 좁은 분지의 형태를 이루고 있다.

이처럼 본 연구 지역은 약 1,000 m의 높은 산지로 둘러싸여, 동서 방향의 좁고 긴 계곡을 형성하고 있

다. 이러한 지형으로 인한 계곡 내의 경계층 변화와 풍향의 변화를 관측을 통해 알아보려 한다.

대상지역의 대기상태를 알아보기 위하여 1999년 10월 17일과 18일, 12월 9일과 10일, 2000년 12월 16일과 17일에 걸쳐 계절별 존재관측을 실시하였다. 이는 계절별 얼음골의 기상상태를 파악하기 위한 것이다. 존재관측을 통하여 기온과 풍향풍속을 측정하였으며, 자동기상관측장비(Automatic Weather System)를 이용하여 정점에서 온도와 풍향풍속을 동시에 측정하였다. 관측위치는 얼음골의 중심부로 동경 128.97°, 북위 35.58°이다.

그림 2는 2000년 12월 16일과 17일의 양일에 관측된 온위의 연직분포를 나타낸 것이다. 낮에는 지표면 가열에 의하여 높은 혼합층을 형성하고, 혼합고가 높게 나타나고, 야간의 지표면 역전이 발생하는 전형적인 분포를 가지고 있다. 그리고 본 지역의 역전층은 산 사면에서 냉기류의 산풍이 형성되고, 저면으로 향하는 냉기류가 계곡 내 저면에 쌓여 냉기호를 형성함으로써 성장하는 것을 알 수 있다. 관측을 바탕으로 야간 역전층과 주간 혼합층의 고도를 나타낸 것이 그림 3이다.

12월 16일을 기준으로 할 경우 일출 시각과 일몰 시각은 각각 07시 30분과 17시 15분이므로 역전층은 일출 시간 보다 약 2시간 가량 늦은 시간에 소멸

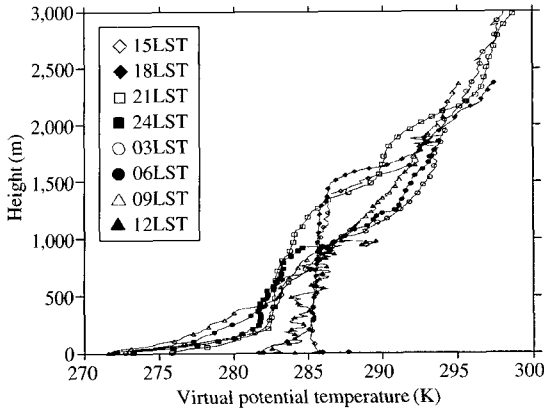


Fig. 2. Diurnal variation of the potential temperature at ice valley. Observation time interval is 3 hours from 1,500 LST.

이 시작되고, 일몰 시간 보다 약 1시간 가량 일찍 형성됨을 알 수 있다. 이것은 관측지점에서 남쪽에 위치한 고도 1,000 m 가량의 능동산과 천황산의 능선에 의해 일출과 일몰 시각의 일사가 차단되어 역전층의 형성 시간이 길어짐을 알 수 있다. 혼합고의 경우 역전층이 형성되어 성장할 때 감소하는 경향을 보이다 일출을 기점으로 다시 성장하며, 일몰 시각까지 꾸준히 증가하다 다시 감소하는 경향을 보인다. 그러므로 혼합고의 높이는 고도 1,400에서 2,000 m까지의 변화를 보였다. 야간의 경우 평균 고도 600 m까지 역전층이 형성되었고, 최고 900 m까지 관측되었다. 그러므로 온실기체 배출위치가 고도 340 m의 터널 입구와 고도 300 m의 24번 국도라는 점을 고려하면, 야간의 경우 온실기체는 최대 약 500m 두께의 공기층내에 체류할 것으로 추정된다.

3. 복사수지 예측모형

지표면 토지이용의 변화와 교통량 증가에 의하여 야기되는 온실가스의 증가에 의하여 대기의 열환경이 어떻게 변화하는지를 보기 위하여 수치실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 수치모형은 CRM (Column Radiation Model) 으로 미국 국립대기과학연구소 (NCAR, National Center for Atmospheric Research)의 대기대순환모형인 CCM (Community Climate Model)에 사용되는 1차원 복사 모델이다.

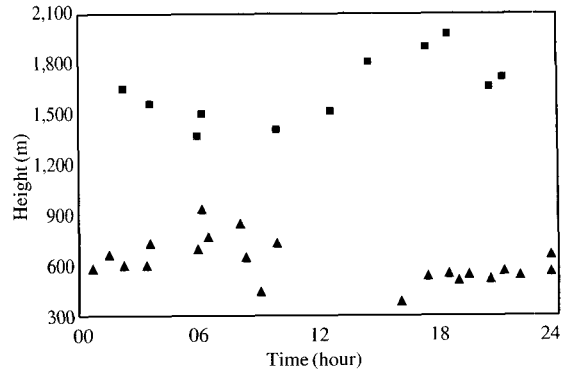


Fig. 3. Diurnal variation of mixing depth and Inversion layer depth. closed triangle and closed rectangular indicate height of mixing layer and inversion layer, respectively.

CRM은 복사 계산에 필요한 간단한 입력 정보를 가지는 text interface에 따라 CCM3의 복사 과정을 독립형으로 실행하도록 변형된 형태의 CCM 하위 모델이다. 1차원 대기는 18층으로 구성되어 있으며, 단파복사와 장파복사가 분리되어 독립적으로 계산되어진다. 단파복사의 경우 0.2 μm에서 5 μm까지 19개의 스펙트럼밴드에 의해서 계산되어지고, 장파복사의 경우 6.5 μm ~ 20 μm까지의 파장영역을 8개의 밴드로 분리하여 계산한다. 온실기체와 관련된 장파복사의 에너지는 아래와 같이 구해진다.

$$F^{\downarrow}(p) = B(0)\epsilon(0, p) + \int_0^p \alpha(p, p') dB(p')$$

$$F^{\uparrow}(p) = B(T_s) - \int_p^{P_s} \alpha(p, p') dB(p')$$

여기서 $B(T)$ 는 Stefan-Boltzmann식에 의해 정의되고, α, ϵ 은 대기의 흡수도와 투과도를 나타내며 아래와 같이 정의된다(Ramanathan and Downey, 1986).

$$\alpha(p, p') = \frac{\int_0^{\infty} (dB_v(p')/dT(p'))(1 - \tau_v(p, p')) dv}{dB(p')/dT(p')}$$

$$\epsilon(0, p) = \frac{\int_0^{\infty} (dB_v(\tau_{\infty})) (1 - \tau_v(0, p)) dv}{dB(0)}$$

여기서 ν 는 파장을 나타내며, B_ν 와 τ_ν 는 각각 Planck 함수와 대기의 투과도를 나타낸다. 그리고 이 식을 바탕으로 단파의 경우 19개, 장파의 경우 8개의 파장별로 분리하며, 각 파장별로 온실기체의 흡수율을 달리하게 된다. 또한 CRM은 지구복사와 자외선 복사 에너지 수지에 대한 연구와 온실기체, aerosol의 복사 영향에 대한 연구, 그리고 종결 실험에 대한 연구에 유용하게 사용되고 있다(Brigleb, 1992).

모델링의 입력 자료에는 대기를 총 18개 층으로 구분하여 지상의 기압에서 최소 2hPa까지의 기압과, 각 층의 기압에 따른 온도장과 수증기, 오존의 농도 분포값이 사용된다. 1차원진단모형이기 때문에 초기 조건은 연직 1차원자료의 입력자료만으로 계산이 가능하며, 복사수지의 경우 수평적인 동일한 대기상태를 가정하기 때문에 경계조건은 큰 영향을 미치지 못한다. 그리고 상면경계의 경우, 매우 높은 고도에 존재하는 온실기체의 열적영향을 보기위한 것으로 상층 경계의 경우 큰 영향을 미치지 못한다. 그 외에도 1차원 복사 모델에 필요한 모델의 위치와 경계층 형성시, 시간, 지표면의 온도 등은 해당 경계층 형성 시각의 관측값을 사용하였다. 각 층의 입력 자료에서 약 500 hPa 이상의 경우는 실제 관측값을 사용하였다. 또한 500 hPa 이하의 경우는 앞서 제시한 UARS 위성에 탑재된 HALOE 기기의 관측 결과값을 사용하였다(기상연구소, 1998).

4. 온실기체와 교통량 산정

터널 공사 이후 터널을 통해 이동할 차량에서 배출되는 자동차 배기가스 중 온실효과에 영향을 미치는 기체에 대하여 알아보았다. 자동차 배기가스는 복잡한 조성을 하고 있지만, 대부분을 차지하는 성분은 인체에 무해한 수증기(H_2O), 질소(N_2), 탄산가스(CO_2) 등이다. 또한 배기가스 중 유해 물질은 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x)을 들 수 있으며, 이외에 약간의 납산화물과 입자상 물질 등이 함유되어 있다. 또한 이러한 유해 물질은 대기 오염 측정과 자동차 배출 가스의 규제 대상이기도 하다.

본 연구에서는 자동차 연료 연소 시 발생하게 될

배기가스 중 온실기체인 이산화탄소와 산화질소, 메탄, 수증기의 영향을 고려하였다.

차량 배출 가스의 측정을 위해 배출구에 Green-Line이라는 측정기를 사용하여 차량 공회전 시 배출되는 대기오염 물질을 주행 거리와 차량의 노후 정도 등, 다양한 경우의 실험을 통해 일산화탄소, 이산화탄소, 질소산화물, 이산화황 등의 농도 분석을 수행한 연구가 있으나 차량 운행과 관련된 전체 대기오염물질의 배출량 측정에 직접 적용하기에는 어려움이 있다(이병규 등, 1999).

또한 대기 오염 물질의 예측과 그에 따른 영향력을 분석하는 많은 연구가 진행되고 있으나, 대기환경 기준이 되는 항목인 먼지와 SO_x , NO_x 에 대한 연구가 대부분이며, 근래에는 도심지의 오존 농도 예측에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 증가할 온실기체의 양을 추정하기 위해, 터널 개통 후 터널과 연구 지역에 확장될 도로를 통해 증가할 교통량을 예측하고, 각각의 교통량이 연구지역 내의 도로를 주행하며 소모할 연료의 양을 계산하였다. 이후 사용될 연료의 양과 그에 따라 방출될 온실기체의 양을 배출계수를 적용하여 추계하는 방법을 사용하였다.

IPCC (Inter-Pannel Climate Change, 1995)는 세계적인 온실기체 변동 추위에 대한 연구를 진행하며, 국가 온실기체 배출량 추계를 위해 연료 연소에 따른 배출 가스 기준 방법을 IPCC Guidelines에 제시하고 있다. 여기서 제시하는 방법은 배출 가스를 이산화탄소(CO_2)와 비이산화탄소(Non- CO_2)로 나누어 각각의 연료 소비량을 기준으로 한 배출 계수를 지정한 것이다(에너지관리공단, 1999).

본 연구에서 고려한 자동차의 연료는 크게 가솔린과 디젤로 구분하였으며, 승용차의 경우 가솔린을 사용하며, 버스나 화물의 경우 대부분 디젤을 사용한다고 가정하였다. 이렇게 분류된 연료에 대하여 다음과 같이 온실기체의 배출 계수를 선정하였다.

IPCC에서 제시하고 있는 연료 연소에 따른 이산화탄소 배출량 산정은 해당 국가 차원에서의 연료 총 투입량과 그에 대한 사용량, 공통 단위로의 전환 과정을 거치며, 제품별 탄소 배출 계수를 선정하였다.

먼저 탄소배출계수는 화석 연료별로 탄소 함유량이 상이하므로 연료별 탄소 배출 계수를 결정하여야 한다. 그러나 국내에서 실시된 연료별 탄소 배출 계

Table 1. Carbon emission factor provided by IPCC (1995).

Fuel	Carbon emission factor		
	KgC/GJ	(Ton C/toe)	(TJ/10 ³ TON)
Gasoline	18.90	0.783	44.80
Diesel	20.20	0.837	43.33

수가 존재하지 않기 때문에 IPCC가 추천한 연료별 탄소 배출을 이용하였다(표 1). 두 번째로 연료가 아닌 제품의 중간재 내지는 최종 제품으로 사용되는 화석 연료에 내포된 탄소는 연소 과정을 거치지 않기 때문에 이산화탄소화 되지 않고, 최종 재화 내에 탄소 형태로 남게 된다. 이러한 몰입 탄소량은 지구 온난화에 직접 영향을 미치지 않기 때문에 온실가스 배출 통계량에서 제외하였다. 그리고 연료에 함유되어 있는 탄소 중 불완전 연소되는 부분은 이산화탄소로 전환되지 않는다고 가정하였다. 그리고 연료 연소율은 연소 종류별, 연소 기기의 기술별로 상이하기 때문에, 사전에 정할 수 없으나, IPCC 방법론에서는 연료별로 평균 연소율을 제시하고 있는데 본 연구에서는 IPCC가 제시한 평균 연소율을 사용하였다.

지금까지 계산을 통하여 얻게 되는 배출량은 탄소량이므로, 이산화탄소 배출량을 구하기 위해서는 위의 탄소 배출량을 이산화탄소 배출량으로 전환시켜 주어야 한다. 연료 연소를 통해 탄소가 산화될 때 산소와 결합하여 질량이 증가하므로, 최종적인 이산화탄소 배출량으로 전환할 때는 이산화탄소와 탄소간의 질량비를 곱하여 총배출량을 구할 수 있다. 화학적으로 이산화탄소와 탄소간의 질량비는 44/12를 사용하였다.

교통기관에서 발생하는 메탄과 산화질소도 비이산화탄소물질 온실기체로서 작용을 한다. IPCC에서 제시된 방법을 사용하여 연소될 연료량을 기준으로 가솔린과 디젤의 CH₄, N₂O의 배출 계수를 사용하였다. 가솔린과 디젤의 메탄과 산화질소의 배출 계수와 추정식은 아래와 같다.

$$\text{Emission} = \sum (\text{EFab} \times \text{ACTIVITYab})$$

EF = emission factor (kg/TJ),
 ACTIVITY = input energy (TJ),
 a = fuel type,
 b = partial activity

수증기도 온실기체의 중요한 부분을 담당하고 있

Table 2. Emission factor of methane and N₂O provided by IPCC (1995).

	Gasoline (kg/TJ)	Diesel (kg/TJ)
	CH ₄	20
N ₂ O	0.6	0.6

다. 본 연구에서 수증기의 경우 연료의 구성 성분을 감안하여 가솔린과 디젤의 성분에 따른 수소와 산소의 결합을 기준으로 연료 1kg 연소시 발생하는 수증기의 양을 kg으로 환산하여 아래 같이 산정하였다.

$$\text{Vapor Emission} = 8.94 h + w \text{ (kg/kg)}$$

여기서 h는 연료 1kg당 존재하는 수소의 질량비를 나타내며, w는 연료 1kg당 존재하는 수증기의 질량비를 나타낸다(이재순, 1996).

지상에서의 오존의 경우 2차 오염물질이므로 배출 자체가 없고, 오존량 산정은 그 생성과 소멸에 대한 다양한 연구가 필요하므로, 본 연구에서는 차량에서 배출되는 오존의 생성은 고려하지 않았다.

그림 2는 연구대상지역의 가상적인 도로망과 터널의 위치를 나타낸 것이다. 도로는 얼음골에 접근성이 용이하게 가정되었고, 예측 교통량의 기준 연도는 2021이며, 터널 이후의 예측 교통량은 표 3과 같다(산외~상복간 제3공구 국도확장공사 설계보고서, 2000). Day의 경우 낮 시간인 오전 7시부터 오후 7시까지 조사한 교통량으로 1일 24시간 중 교통량이 가장 큰 1시간의 교통량을 나타낸다. Night는 오후 7시부터 다음날 오전 7시까지의 교통량중 가장 많은 1시간의 교통량을 의미한다.

현 교통량의 산정과 달리 예상 교통량의 경우 총 연장 길이가 4.58 km인 터널 내에서 발생하는 물질이 모두 연구 지역으로 발산되지 않으며, 그중 일부만이 영향을 줄 것으로 가정하였으며, 이후 연구 지역의 일반국도 24호선의 얼음골 교차로까지 인접하는 6.5 km를 예상 범위로 한정하였다.

이산화탄소와 그 외의 온실기체 산정시 표 4와 같이 예측된 교통량의 차종을 기준으로 배기량과 연비를 분류하였으며, 이를 통해 주행 시의 연료 소모량을 계산하였다. 그러나 계산된 연비는 개개 차량의 특성 및 관리 상태, 도로 상태, 교통량 및 교통 관제 시스템, 운전 습관, 계절 및 기상 상태 등 여러 요인에 의하여 영향을 받기 때문에 도로 상황과 운전자

Table 3. Traffic Density Estimated in 2021.

Time	Passenger Car	Bus			Truck			Total
		Small	Medium	Large	Small	Medium	Large	
Day	2,470	274	112	74	463	357	148	3,898
Night	444	49	20	13	83	64	27	700

Table 4. Average fuel economy of different types of car. Class of each car are divided by Engine displacement.

Class	Engine displacement (cc)	Combustion rate (km/l)	Consumption per unit km
Passenger car	800, 1500, 2000, 3000, 4500	12.4	0.0806
	small 2400 ~ 2600 3300 ~ 4000	16.0	0.0625
Bus	mid. 7500 ~ 8000	7.2	0.1389
	large 11000 14000	6.0	0.1667
Truck	small 2300 ~ 2600	14.8	0.0676
	mid. 3000 ~ 3500	11.5	0.0870
	large 11000 ~ 16000	6.2	0.1613

Table 5. Deigns of Numerical experiments.

Case	Mixing height (m)	Remark
CRM-CASE 1	350	역전층 얼음골 이하
CRM-CASE 2	410	얼음골 결빙처 고도
CRM-CASE 3	540	얼음골과 수직갱 사이
CRM-CASE 4	590	수직갱 고도
CRM-CASE 5	1,500	주간 혼합층

Table 6. Specific volume under inversion and mixing layer used in numerical experiments.

CRM case number	Volume (m ³)
1	4.8547 × 10 ⁸
2	1.0209 × 10 ⁹
3	2.8970 × 10 ⁹
4	3.8335 × 10 ⁹
5	3.6075 × 10 ¹⁰

에 따라서 어느 정도의 연비 차이는 불가피하다.

5. 배경농도산정과 수치실험설계

본 연구에서는 개통 이후의 교통량 증가량에 따른 온실기체의 영향 이외에도 실제 연구 지역의 온실기체 배경농도의 분포를 고려하였다.

온실기체의 배경농도는 국내 제주도 고산 관측소의 온실기체 배경농도 관측과 그 변동 특성에 관한 연구 자료를 이용하였다. 1990년 8월부터 2001년까지 제주도 고산에서 관측된 자료에서 우리나라의 평균적인 이산화탄소 농도 값의 변화는 계절 변화를 뚜렷이 보이고 있다. 또한 1990년에 약 356 ppm에서 1998년에는 368 ppm으로 지속적으로 증가해 왔으며, 증가율은 약 1.5 ppm/yr이다. 그리고 이러한 이산화탄소의 증가율은 전지구적 이산화탄소 증가율과 거의 같은 것으로 분석되었다(기상연구소, 1994). 그래서 본 연구의 경우, 이산화탄소의 배경농도를 368 ppm을 현재의 배경농도로 상정하고, 이것을 기준으로 2021년의 배경농도를 산정하였다. 그리고 산화질

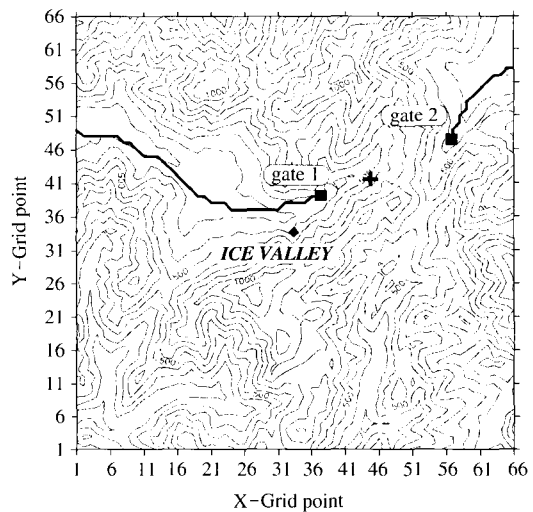


Fig. 4. Route of road and location of the entrance of tunnel. thick line indicate expected road and closed rectangular and cross menas entrance and ventilation hood.

소와 CFC-11/12의 경우, 기상연구소 고산배경농도 관측소에서 1994년 1월 이후에 관측되고 있으며, 배

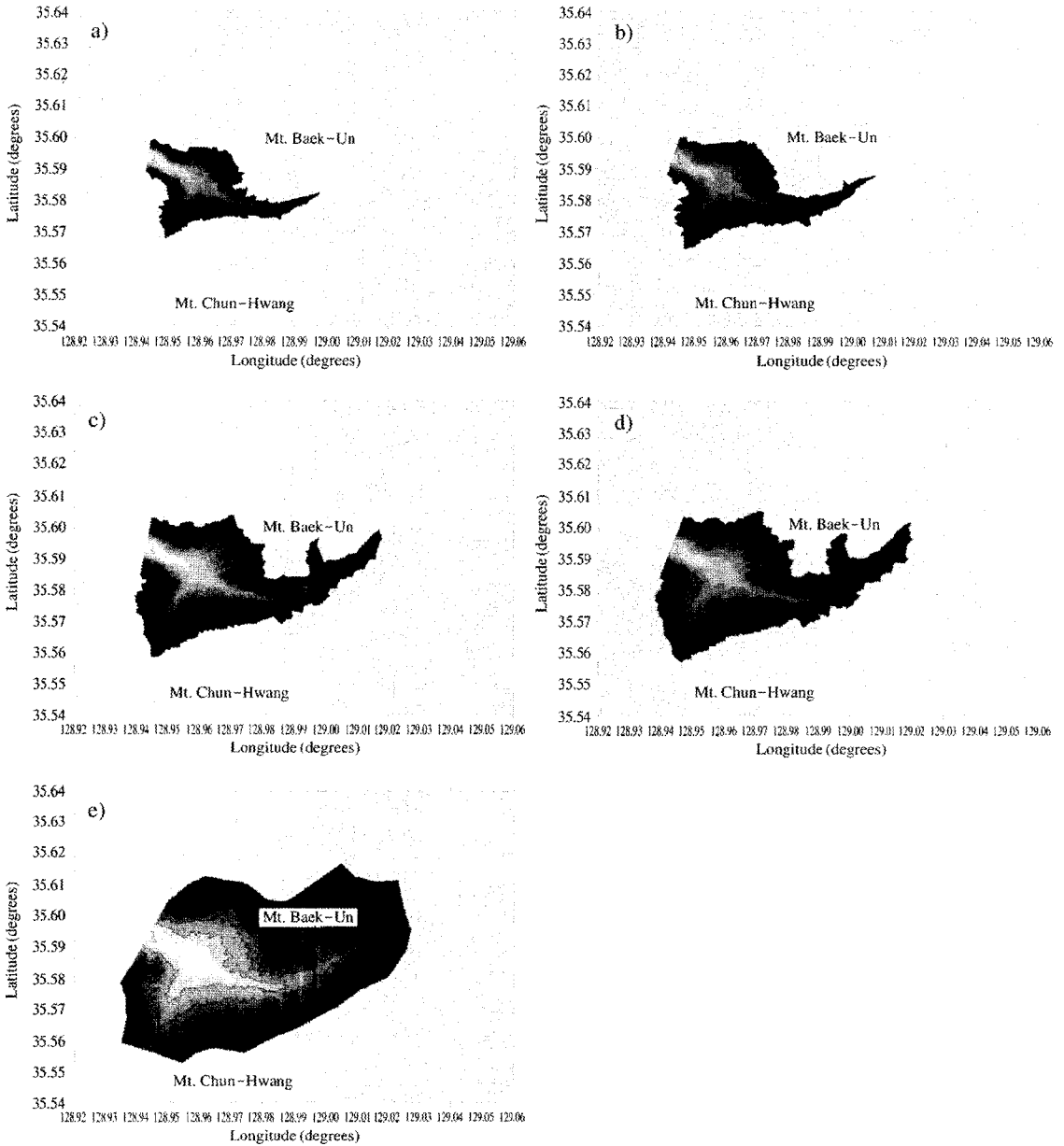


Fig. 5. Horizontal mixing area in a) Case 1, b) Case 2, c) Case 3, d) Case 4, and e) Case 5.

탄의 경우 1995년 1월 이후에 관측이 시작되었다. 관측결과 각각의 월 평균 농도는 메탄이 1.8 ppmv, 산화질소가 310 ppbv, CFC-11이 270 pptv, CFC-12가 528 pptv의 값을 나타내었다. 또한 IPCC의 1995년 보고서에 의하면 메탄은 연간 10 ppbv, 산화질소

는 연간 0.80 ppbv의 증가율을 보이는 것으로 나타났다. 그러므로 현재 기상연구소 고산관측소 자료를 현재의 배경농도라고 상정하고, IPCC가 제안한 농도 증가율을 이용하여 온실기체에 의한 기온증가율에 관한 수치실험을 실시하였다.

Table 7. Density of several green house gases before and after road construction in Ice valley. Unit of gases except for H₂O is ppm and H₂O is expressed in kg/m³ unit.

Gas	Current	CRM-CASE 1	CRM-CASE 2	CRM-CASE 3	CRM-CASE 4	CRM-CASE 5
CO ₂	368	399.1846	398.5633	398.1985	398.1500	398.0888
N ₂ O	0.31	0.326010	0.326005	0.326002	0.326001	0.326001
CH ₄	1.8	2.000153	2.000073	2.000026	2.000019	2.000012
H ₂ O	Observation	9.54 × 10 ⁻⁷ increase	4.54 × 10 ⁻⁷ increase	1.60 × 10 ⁻⁷ increase	1.21 × 10 ⁻⁷ increase	7.15 × 10 ⁻⁷ increase

Table 8. Time of atmospheric observation data used in numerical simulations.

CRM case number	Date	Time (LST)
1	1999. 10. 17	18:50
2	1999. 12. 09	19:00
3	1999. 12. 10	09:00
4	2000. 12. 17	08:15
5	2000. 12. 17	12:32

본 연구에 사용된 CRM은 1차원 복사모형이기 때문에 3차원적인 공기의 이류에 의한 영향을 고려할 수 없다. 그래서 방출된 온실기체는 태양복사에 의하여 형성된 혼합층에 의하여 균일하게 분포한다고 가정하였다. 야간의 경우, 지표면 장파복사에 의하여 생성되는 역전층이 형성되고, 지형에 의해서 생성된 동남풍 냉기류를 타고, 역전층 형성 고도 보다 낮은 영역에서 체류하는 것으로 가정하여 농도를 계산하였다.

얼음골지역의 집중관측자료를 바탕으로 일 중 혼합고와 역전층의 고도 분포에서 주간인 경우 최고 고도 1,500 m을 혼합고로 선정하였으며, 복사모형 계산에 이용된 각 경우에 대한 역전층의 높이는 4가지 경우를 산정하여 실험하였다. 즉 얼음골의 결빙지점을 중심으로 구분하였다. 그리고 앞 절에서 산정한 온실기체가 각 혼합층 또는 역전층 내에 체류하는 것으로 가정하고 계산하였다.

위에서 정한 경계층에 대하여 교통량에서 추계된 온실기체가 방출되어 경계층 이하에 분포할 것으로 예상한 영역은 그림 5와 같으며, 이때 영역 내의 체적은 표 6과 같다.

앞서 구한 교통량에 따른 온실기체의 방출량과 경계층의 고도 변화에 따른 체적을 기준으로 온실기체의 배경농도의 값과 그에 따른 연간 변동량에 의한 농도 변화를 모두 고려한 계산 결과는 표 7과 같다.

CRM모델의 입력 자료는 앞 절에서 구한 각 온실

기체의 농도자료와 실제 존재 관측에서 구한 일반 기상장 자료가 이용된다. 표 8은 각 실험에 사용한 기상장의 적용날짜이다. 기상장의 연직분포는 각 고도의 혼합층과 역전층고도를 고려하여 선정하였다.

6. 토지이용 변화에 따른 승온효과

CRM 모델링 결과는 각종 압력값에 해당하는 순복사의 값으로 승온률 (K/day)의 단위로 제시되며, 각각의 실험에 대한 승온률의 연직 분포는 다음과 같다.

그림 6은 표 7과 8의 자료를 이용하여 계산한 고도별 승온율을 나타낸 것이다. 즉 현재와 각각 혼합고 및 역전층고도에서의 농도변화를 가정한 경우의 승온율을 의미한다.

CRM-CASE 5는 주간의 경우이므로 지표면 부근 대기의 승온효과는 양수를 나타내고 복사 에너지 전달에 의하여 가열이 일어나고 있음을 나타낸다. 반면 다른 경우(CRM-CASE 1, 2, 3, 4)는 일몰 이후에 역전층이 발달하는 시각이므로 지표면 부근의 승온율은 음수이며 복사에너지 전달과정에 의하여 냉각이 우세함을 나타낸다고 할 수 있다. 또한 계절과 시각의 차이로 인한 단파복사에너지의 차이와 연직 기온 분포의 차이로 인하여 각각의 경계층 변화에 따른 승온률의 분포는 매우 다르게 나타나지만, 다섯 경우 모두 현재와 터널 건설 후의 승온율 자체의 차이는 미미한 것으로 나타났다. 그러나 중관 규모의 기상장이 정체되고 온실기체가 계곡 내에 정체되어 높은 농도가 장기간 지속될 경우 승온효과는 누적되어 기온 상승을 일으킬 수 있다.

터널 개통에 의한 지표면 토지이용의 변화후와 현재의 승온률의 차를 고려함으로써, 차량증가 등 환경 변화에 의하여 배출되는 온실기체의 농도에 의한 승

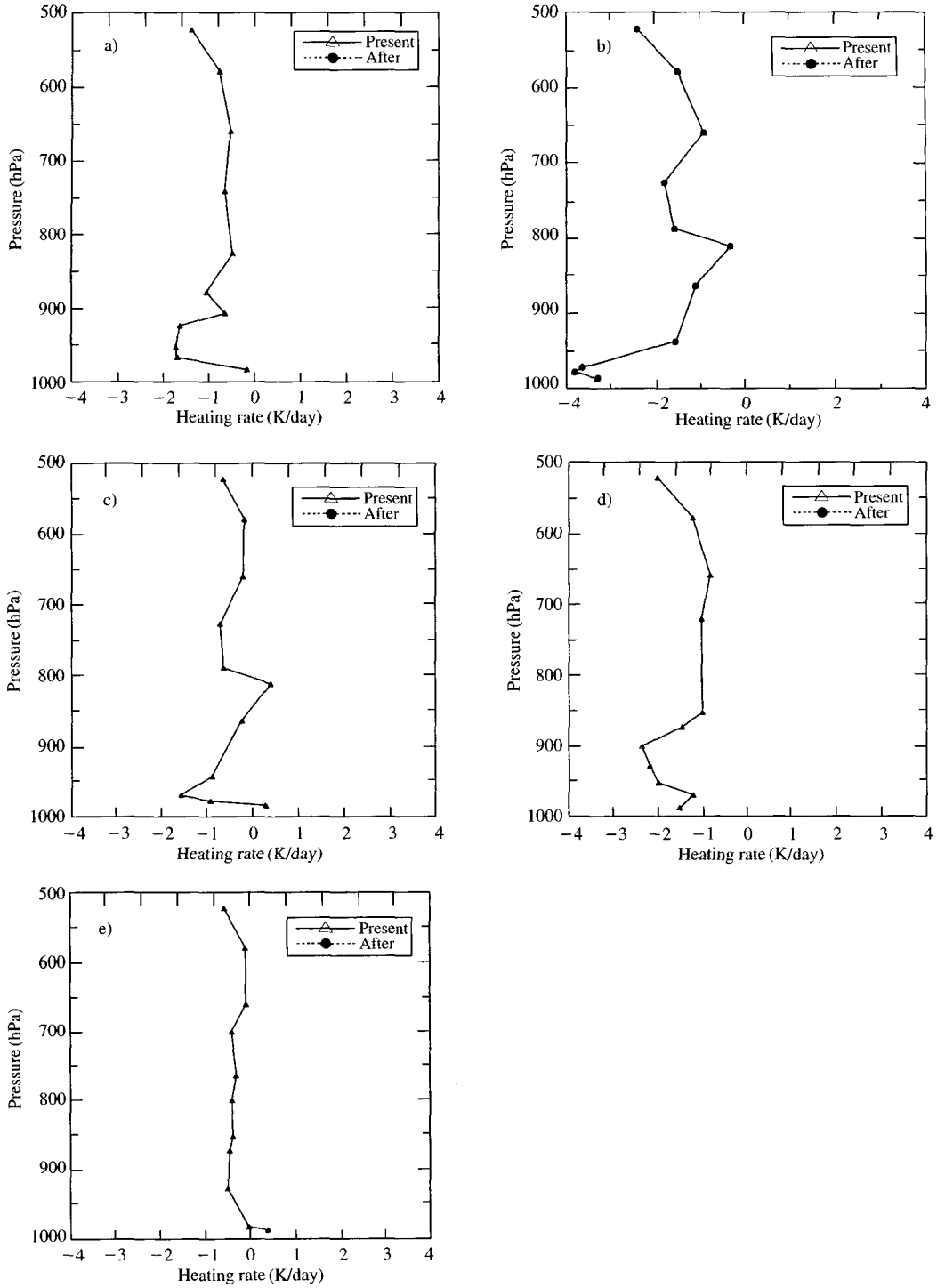


Fig. 6. Heating rate before/after land-use change in a) Case 1, b) Case 2, c) Case 3, d) Case 4, and e) Case 5. Unit of the heating rate is K/day.

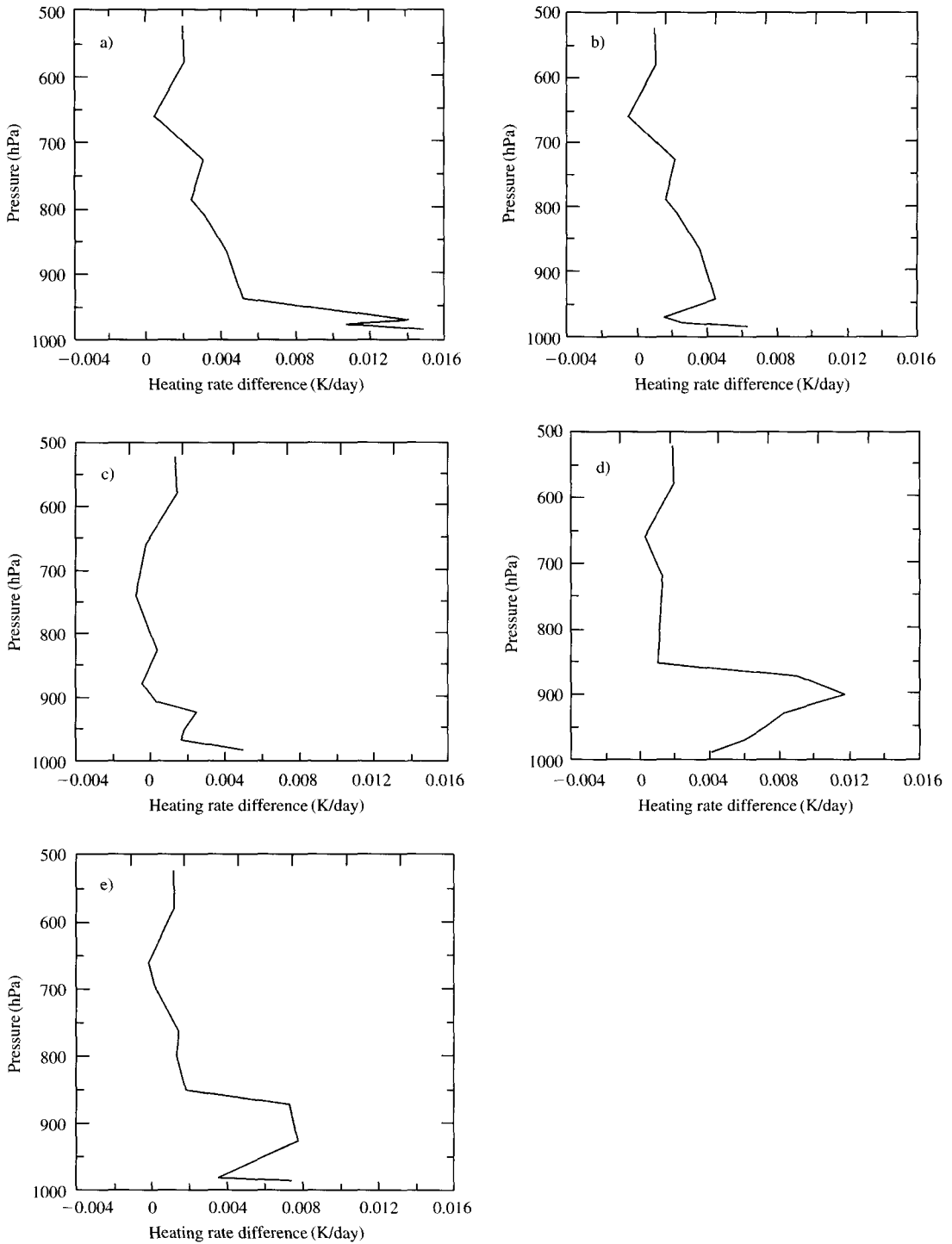


Fig. 7. Difference between heating rate before and after land-use change in a) Case 1, b) Case 2, c) Case3, d) Case 4, and e) Case 5. Unit of the heating rate is K/day.

Table 9. Increase of heating rate near surface calculated at each cases.

CRM case number	Heating rate (K/day)
1	0.014113
2	0.006348
3	0.004985
4	0.004077
5	0.007440

온률의 영향을 살펴보았다. 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 각 CRM-CASE는 계절과 시각이 다르므로 앞에서 본 것과 같이 승온율 자체의 값은 매우 다른 값을 보이며, 마찬가지로 승온율의 차이도 각 CRM-CASE에 따라 상이한 값을 보인다. 그러나 5가지 경우 모두에서 온실기체의 농도 증가로 인하여 온도 상승효과를 가지는 것으로 나타났다. 지표면 부근의 상승효과는 대기 상층의 상승 효과보다 전반적으로 크게 나타났다. 지표면 부근의 승온율 차이가 가장 컸으며, 상층으로 갈수록 대체적으로 그 값은 작아진다. 한편 900 hPa 부근에서 승온율의 차이가 크게 나타나는 경우가 있는데 (CRM-CASE 4, 5), 이는 이 고도의 수증기량 분포와 관련이 있는 것으로 보인다.

지표면 부근 승온율의 차이는 CRM-CASE 1이 0.014 K/day 정도로 가장 크게 나타났다. 이는 역전층의 고도가 낮아 온실기체의 농도가 높은 값을 가지게 되었기 때문이다. 또한 CRM-CASE 5가 그 다음으로 큰 값을 나타낸다. 이는 CRM-CASE 5는 주간의 경우이므로 단파와 장파복사에너지 자체의 값이 크기 때문으로 생각된다. 즉, 온실기체의 농도증가량은 작은 값을 가지므로 온실기체의 흡수되는 비율은 낮지만, 복사에너지 자체의 값이 크기 때문에 온실기체의 흡수되는 에너지량은 크게 나타난다. 또한 야간 접지 역전층이 형성되는 경우 중에서는 CRM-CASE 2의 경우 승온효과가 0.00634 K/day로 두 번째로 크게 나타났다. CRM-CASE 3과 4의 경우는 각각 0.004985 K/day와 0.004077 K/day의 작은 값을 보였다.

온실기체의 농도 증가로 인한 승온율의 차이는 다음과 같은 특징을 갖는다고 볼 수 있다. 먼저 지표면 부근의 승온효과가 상층의 승온효과 보다 크게 나타났다. 즉, 지표면 부근에서 승온율의 상승이 크게 나타나고, 상층으로 갈수록 차이는 점점 작아져서 0에

가까워진다. 또한 역전층의 높이가 낮을수록 온실기체의 농도 증가값이 커지므로 온도상승율이 더 크게 나타난다. 주간의 경우는 온실기체 농도증가값은 작지만, 전달되는 복사에너지량 자체가 큰 값을 가지므로 상대적으로 큰 승온율을 갖는다고 볼 수 있다. 그러나 다섯 경우 모두에 대해서 승온율의 증가량은 0.015 K/day 보다 작은 값을 가진다. 일반적으로 지표면 부근에서 온도변화로 발생하는 일교차인 10 K/day 정도의 값에 비교할 때 1.5/1000보다 작은 값이며, 이는 온실기체의 농도 증가에 따른 온도변화요인은 다른 요인에 비해서 매우 작은 값을 의미한다고 볼 수 있다. 각 경우에 대한 지표면 부근의 승온율 차이는 표 9와 같다.

7. 결 론

산악지역에서의 도로 및 터널 건설 등에 의한 토지이용변화는 온실기체의 양적인 변화를 가져오고, 이는 국지대기의 온난화와 직결된다. 본 연구는 경상남도 밀양 얼음골 주변의 토지이용변화가 미기상규모의 열적환경에 미치는 영향을 수치실험을 통하여 살펴보고자 하였다.

아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 동계의 얼음골의 혼합고의 높이는 1,400 m에서 2,000 m까지 성장을 하며, 평균 1,500 m이며, 야간 역전층은 최고 900 m까지 관측되었다.

2) 도로 및 터널건설이 진행되고 있는 밀양 얼음골 주변의 통행량의 추정치를 통하여 가솔린을 연료로 사용하는 승용차가 2,500여대, 디젤을 연료로 사용하는 상용차가 1,500여대로 예상되었으며, 이들의 통행량은 오후 1시로 나타났다.

3) 통행량 증가에 따른 온실기체의 예측량은, CO₂가 398 PPM, NO_x가 0.32 PPM, 메탄이 2.0 PPM으로 나타났다.

4) 온실기체의 승온효과는 지표면부근이 상층보다 크게 나타났으며, 낮은 혼합고 및 낮은 역전층하에서 높은 승온률을 나타내었다.

5) 지표면에서의 온실기체에 의한 가열증가율은 평균 0.0073 K/day이다. 이러한 온실기체에 의한 가열증가율은 일반적인 지표면의 일교차량인 10 K/day 보다 작은 값을 가지기 때문에 국지적인 기상장에 영

향을 미치지지는 못할 것으로 보인다.

본 연구는 중립의 대기안정도를 가정하고, 미래의 교통량을 가정한 매우 제한적인 조건하에서 산출한 값이기 때문에 절대량으로 판단할 수는 없으나, 도로 건설에 의하여 발생하는 온실기체가 국지기상의 온도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다는데 의의가 있다. 분석결과 온실기체의 가열증가율이 매우 미미하게 나타나고 있으나, 지구대기의 배경농도증가와 국지적인 온실기체 축적은 장기간적인 국지기상의 변화를 유도 할 것으로 보인다. 그리고 매우 제한적인 조건하에서 1차원적인 복사모형을 이용하였기 때문에 3차원적인 이류 등의 영향은 고려되지 않았다. 그러므로 종관기상장의 변화와 3차원적인 바람장에 의하여 충분히 변화할 가능성이 존재하며, 이들 조건의 변화는 얼음골지역에서 고농도의 온실가스가 검출될 가능성이 충분히 존재한다. 그러므로 3차원적인 이류를 포함한 연구가 더욱 진행되어야 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 연구(보조)비(4년과제)에 의해 수행되었습니다. 그리고 학회 논문심사위원의 조언에 감사드립니다.

참고 문헌

건설교통부(2001) 산외-상복간(능동터널) 국토 확장공사 환경영향평가서, 859pp.

기상연구소(1994) 온실기체 감시 시스템 개발 연구(II), 302pp.

기상연구소(1998) 지구대기 조성변화 감시-지구규모 대기 환경 기초 및 기반 기술, 579pp

에너지관리공단(1999) 온실가스 배출량 산출지침, 1019pp.

이병규, 조성용, 나덕재, 정혁용, 정관륜, 이채복(1999) 차량 공회전 시 배출되는 대기오염물질의 배출 특성, 한국환경과학회지, 8(1), 27-32.

이순환, 이화은, 김유근(2002) 복잡지형에서 도시화에 따른 대기확산에 관한 수치시뮬레이션, 한국대기환경학회지, 18(2), 67-83.

이순환, 서광수, 황수진(2004) 산악지역 도로건설에 따른 국지 대기순환의 변화에 관한 연구, 한국지구과학회지, 25(2), 94-108.

이재순(1996) 연소공학, 보성문화사, 484pp.

하경자, 하은호, 류정희, 이효신, 김기영(1998) 대기 이산화탄소의 점중에 따른 대기/해양 접합 모형 지표 기온의 일시적 변동성 분석, 한국환경과학회지, 7(1), 27-35.

Briegleb, B.P.(1992) Delta-Eddington approximation for solar radiation in the NCAR Community Climate Model, J. Geophysical Research, 97, 7603-7612.

IPCC(1995) Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change, Scientific Technical Analyses, 878pp.

Lee S.H., and F. Kimura(2001) Comparative studies in the local circulation induced by land-use and by topography, Boundary Layer Meteorology, 101, 157-182.

Santer, B.D., U. Mikdajewicz, and G. Hegerl(1993) The use of general circulation models in detecting climate change indeed by greenhouse gases, PCMDI Report, No.10.

Ramanathan, V., and P. Downey(1986) A nonisothermal emissivity and absorptivity formula for water vapor, J. Geophysical Research, 91, 8649-8666.