



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

CALPUFF모델을 이용한 소각시설 배출가스의 시·공간적 영향 예측



濟州大學校 大學院

海洋氣象學 協同科程

梁 起 豪

2015年 2月

碩士學位論文

CALPUFF모델을 이용한 소각시설 배출가스의 시·공간적 영향 예측



濟州大學校 大學院

海洋氣象學 協同科程

梁 起 豪

2015年 02月

CALPUFF모델을 이용한 소각시설
배출가스의 시·공간적 영향 예측

지도교수 이 기 호

양 기 호

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함.



2015年 02月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

양기호의 이학 석사학위 논문을 인준함.

심사위원장 허철구 ㉠

위 원 감상규 ㉠

위 원 이기호 ㉠

제주대학교 대학원

2015年 02月

Prediction of temporal and spatial variation
of the emission from MSW incineration
facility by using CALPUFF model

Ki-Ho Yang

(Supervised by professor Ki-Ho Lee)



A thesis submitted in partial fulfillment of
the requirement for the degree of
Master of Science

Graduate Program in Marine Meteorology
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2015. 2.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vi
ABSTRACT	vii
1. 서론	1
2. 이론적 배경	3
2.1 CALPUFF모델	3
2.2 CALMET모델	7
3. 연구방법	10
3.1 연구대상지역	10
3.2 모델입력자료	11
가. 지형자료	13
나. 기상자료	13
다. 대기오염물질 배출량 자료	15
3.3 대기질 자동측정방법	19
4. 결과 및 고찰	20
4.1 지역현황 분석	20
가. 제주지역 기상개황	21
나. 연구대상지역 대기질 현황	31
4.2 오염물질의 확산범위예측	32
가. 대기오염물질의 확산형태	32
나. 대기오염물질의 분산형태 분류	50

다. 배출량 저감에 따른 확산형태	52
라. 사례일 분석	55
5. 결론	58
참고문헌	59
감사의 글	61



LIST OF FIGURES

Fig. 1. Splitting process for a puff from the emission source at time	4
Fig. 2. Overview of CALMET/CALPUFF modeling system	5
Fig. 3. CALMET non-staggered horizontal grid system	8
Fig. 4. Schematic Diagram of WRF process	9
Fig. 5. CALPUFF Modeling Domain	10
Fig. 6. Topography of modeling domain considered in this study	12
Fig. 7. The nested model domain for WRF simulations and topography of the domain 4	10
Fig. 8. Emission rates of NO _x and TSP from area and line sources	16
Fig. 9. Monthly averages of wind speed(a) and precipitation(b) during the last ten years	21
Fig. 10. Wind rose in Jeju city during the last ten years	22
Fig. 11. Wind rose measured at each weather station for January and February	24
Fig. 12. Wind rose measured at each weather station for March and April	25
Fig. 13. Wind rose measured at each weather station for May and June	26
Fig. 14. Wind rose measured at each weather station for July and August	28
Fig. 15. Wind rose measured at each weather station for September and October	29
Fig. 16. Wind rose measured at each weather station for November and December	30
Fig. 17. The contour of NO ₂ concentration modeled for January and February	33

Fig. 18. The contour of PM ₁₀ concentration modelled for January and February	33
Fig. 19. wind rose predicted for Jan. and Feb. at the site of New MSW incinerator	34
Fig. 20. The position of daily max. ground level concentration of NO ₂ and PM ₁₀ modelled for January and February	35
Fig. 21. The contour of NO ₂ concentration modelled for March and April	36
Fig. 22. The contour of PM ₁₀ concentration modelled for March and April	36
Fig. 23. wind rose predicted for Mar. and Apr. at the site of New MSW incinerator	37
Fig. 24. The position of daily max. ground level concentration of NO ₂ and PM ₁₀ modelled for March and April	38
Fig. 25. The contour of NO ₂ concentration modelled for May and June	39
Fig. 26. The contour of PM ₁₀ concentration modelled for May and June	39
Fig. 27. wind rose predicted for May. and Jun. at the site of New MSW incinerator	40
Fig. 28. The position of daily max. ground level concentration of NO ₂ and PM ₁₀ modelled for May and June	41
Fig. 29. The contour of NO ₂ concentration modelled for July and August	42
Fig. 30. The contour of PM ₁₀ concentration modelled for July and August	42
Fig. 31. wind rose predicted for Jul. and Aug. at the site of new MSW incinerator	43
Fig. 32. The position of daily max. ground level concentration of NO ₂ and PM ₁₀ modelled for July and August	44

Fig. 33. The contour of NO ₂ concentration modelled for September and October	45
Fig. 34. The contour of PM ₁₀ concentration modelled for September and October	45
Fig. 35. wind rose predicted for Sep. and Oct. at the site of New MSW incinerator	46
Fig. 36. The position of daily max. ground level concentration of NO ₂ and PM ₁₀ modelled for September and October	47
Fig. 37. The contour of NO ₂ concentration modeled for November and December	48
Fig. 38. The contour of PM ₁₀ concentration modelled for November and December	48
Fig. 39. wind rose predicted for Nov. and Dec. at the site of New MSW incinerator	49
Fig. 40. The position of daily max. ground level concentration of NO ₂ and PM ₁₀ modelled for November and December	50
Fig. 41. The comparative analyses of area of influence of flue gas from MSW faicity which is operating at the emission cocentration of NO ₂ with the present Korea emission standard and the reduced level less than the present standard	53
Fig. 42. The comparative analyses of area of influence of flue gas from MSW faicity which is operating at the emission cocentration of PM ₁₀ with the present Korea emission standard and the reduced level less than the present standard	54
Fig. 43. The wind field of CALMET	56
Fig. 44. The simulated distributions of NO ₂ and PM ₁₀ concentrations by CALPUFF model	57

LIST OF TABLES

Table 1. The Input data of modeling domain	11
Table 2. Location of weather station	13
Table 3. Grid options used in WRF Model	14
Table 4. Emission rates of NO _x and TSP from area and mobile sources applied to this study	15
Table 5. Emissions of NO ₂ and PM ₁₀ from point sources applied to this study	17
Table 6. Selected input data for stack conditions for New MSW facility	18
Table 7. Emission of the existed large-scale MSW incineration facilities	18
Table 8. Air pollution automatic monitoring station within the domain of this study	19
Table 9. Summary air quality data at Ido Automatic monitoring station during 2013	31



Abstract

This study is carried out to predict the temporal and spatial variation of emission from new municipal solid waste incineration facility (MSW facility) by using the CALPUFF model.

It can be seen that the contributing concentration at each receptor point was relatively low although the MSW facility is operating with the present Korean Emission Standard. As a result of modelling, the maximum contributing concentration is 0.665 ppb of NO₂ and 0.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of PM₁₀. It can be concluded that the effect of flue gas from new MSW facility on its surroundings is insignificant because of the low contributing concentrations of air pollutants emitted from New MSW facility.

The dispersive types of flue gas from New MSW facility can be classified into four categories on the north-eastern part of Jeju Island, that is, winter type (Jan., Feb., Nov., and Dec.), spring type (Mar. ~ May), summer type (Jul. and Aug.) and Fall type (Sep., Oct., and Jun.). This is due to that CALPUFF model well reflects the wind change according to variation of time.

However, the results of modelling in this study were not considered the wet deposition of air pollutants by the rainfall.

1. 서론

생활수준의 향상과 인구의 밀집화로 인해 폐기물 처리문제가 현대 사회에서 이슈가 되고 있으며, 생활폐기물 매립시설이 과포화 상태가 되어 더 이상 매립할 수 없는 상황도 나타나고 있는 실정이다. 이에 쾌적한 주민들의 생활과 직결되는 폐기물을 보다 안전하고 효율적으로 처리하지 못할 경우 주민들의 삶의 질을 떨어뜨릴 뿐 아니라 보건위생에도 큰 해를 끼칠 수가 있으며, 더 나아가 자원의 낭비를 초래하게 되는 결과를 낳게 된다. 따라서 환경기초시설은 보다 효율적이고 안전하게 건설되고 운영되어야 한다.

그렇지만 현실적으로는 환경기초시설의 설치와 가동에 따른 악취, 수질 및 대기오염 등의 문제를 우려하는 주민들의 반대로 인해 입지 선정에서부터 큰 어려움을 겪고 있는 실정이다. 환경기초시설 중에서도 대규모 소각시설을 건설할 경우에는 각종 유해오염물질의 배출로 인한 영향을 미리 예측하여 향후 운영 시에 나타날 수 있는 각종 문제를 사전에 파악해야 할 필요성이 있다. 특히 대기오염물질의 확산범위와 농도수준을 사전에 예측하기 위해 많은 대기오염확산모델들이 개발되고 활용되고 있다.

대기오염확산모델은 오염물질의 확산방정식을 이용하여 수용지점에서의 오염물질 농도를 예측하는 것으로 확산 방정식에 따라 대기오염 확산평가의 정확도 및 특성이 정해지게 된다. 따라서 대기오염확산모델 대상지역의 규모 및 특성, 대상물질 조건에 적합한 확산 방정식을 이용하는 모델을 선택하는 것이 중요하다 (Yoon, 2002).

발전소나 소각시설과 같은 대규모의 점오염원 배출시설은 대부분 해안이나 골짜기 등과 같이 외딴 곳에 위치하고 있으므로 이러한 지형적 특성을 잘 반영하여 대기오염물질의 확산을 예측해야만 한다.

대기오염예측에 널리 사용되고 있는 확산모델 중 가우시안 확산모델은 계산과정의 비교적 간단하고 입력 자료의 수집이 어렵지 않으므로 널리 사용되고 있으나, 여러 가지 제한점으로 인하여 모델의 계산결과는 실제와 크게 다를 가능성이 있다(Son, 2005). CALPUFF 모델은 미국 EPA에서 지정한 권장 모델의 하나로 비

정상 상태를 가정한 puff 모델로 시간에 따른 기상 상태의 변화에 대해 오염물질의 이동과 변화, 제거를 계산할 수 있는 모델이다. 즉, 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 오염물질을 작은 puff로 배출되어 확산된다고 가정하여 puff가 위치한 지점에서 해당 시각의 풍향, 풍속에 의하여 이동되며, puff의 중심에서 확산은 정규분포를 이룬다는 가정 하에 임의의 시간별로 농도분포를 계산한다. 따라서 CALPUFF 모델은 가우스 분산모델에 비해 풍향, 풍속의 시간 변화와 지역적 차이를 보다 잘 고려할 수 있으며 시간에 따른 puff의 배출량 변화도 고려할 수 있다.

제주도에는 대기오염물질의 배출량이 비교적 적을 뿐 아니라 특징적인 배출이 이루어지는 점오염원이나 면오염원의 수도 적은 것으로 파악하고 있다. 이러한 지형적 여건은 이 지역에 새로운 대형 배출시설이 운영될 경우 그 배출원에 의한 배기가스 영향 범위를 파악하고 특징을 해석하는데 이로울 수가 있다.

제주시는 현재 200 ton/day 규모의 광역폐기물소각로를 운영하고 있으나 이의 노후화와 폐기물 반입량의 급등으로 그 수요에 잘 대처하지 못하고 있는 실정이며, 그에 따른 폐기물의 매립수요가 증대하고 있으나 매립시설 또한 그 처리에 한계를 맞고 있다. 따라서 제주도에 새로운 소각시설이 가동될 경우 이 소각시설에서 배출되는 배출가스의 영향범위 등을 사전에 파악할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 새롭게 가동될 대형 폐기물 소각시설에서 배출되는 분산형태를 중규모 및 지표 기상을 함께 고려할 수 있는 CALPUFF 모델을 이용하여 예측하고자 하였다. 그리고 대형 폐기물소각시설의 배출량 저감 시나리오에 따른 영향범위 등의 변화를 예측함으로써 소각로 운영의 가이드라인도 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 CALPUFF모델

2.1.1. 모델의 개요

CALPUFF 모델은 비정상상태(unsteady state)를 가정한 puff 모델로써 기상상태의 시간에 따른 변화에 대해 오염물질의 이동과 변화, 제거를 계산 할 수 있는 U.S. EPA에서 지정한 권장 모델중 하나이다. 지속적으로 건설될 배출시설로부터의 영향을 미리 예측하거나, 배출원 주위 전 지역의 농도 분포를 분석하거나, 대기오염관리대책의 효과를 미리 비교평가하기 위해서는 오염물질의 확산현상을 나타낼 수 있는 대기오염확산모델이 필요하다.(Jang & Song, 1995) CALPUFF 모델은 진단적 바람장 모델(diagnostic wind field model)인 CALMET 모델을 기상의 전처리 프로그램으로 적용하였을 때의 CALPUFF 모델과 기존의 MESOPUFF II 모델을 비교 평가하여 CALPUFF 모델 시스템을 U.S. EPA에서 추천하게 되었다.

Fig. 1에는 시간에 따른 puff의 이동과 상장에 대한 개념도를 보이고 있다. CALPUFF 모델은 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 오염물질은 작은 puff로 배출되어 확산된다고 가정하고 puff가 위치한 지점과 해당시각의 풍향, 풍속에 의하여 이동되며 puff의 중심에서 확산은 정규분포를 이룬다는 가정하에 임의의 시간별로 농도분포를 계산한다. 따라서 gaussian puff 모델인 CALPUFF 모델은 시간에 따른 풍향과 풍속의 변화 그리고 지형의 차이를 고려 할 수 있을 뿐 아니라 시간에 따른 puff의 배출량 변화도 고려할 수 있다.

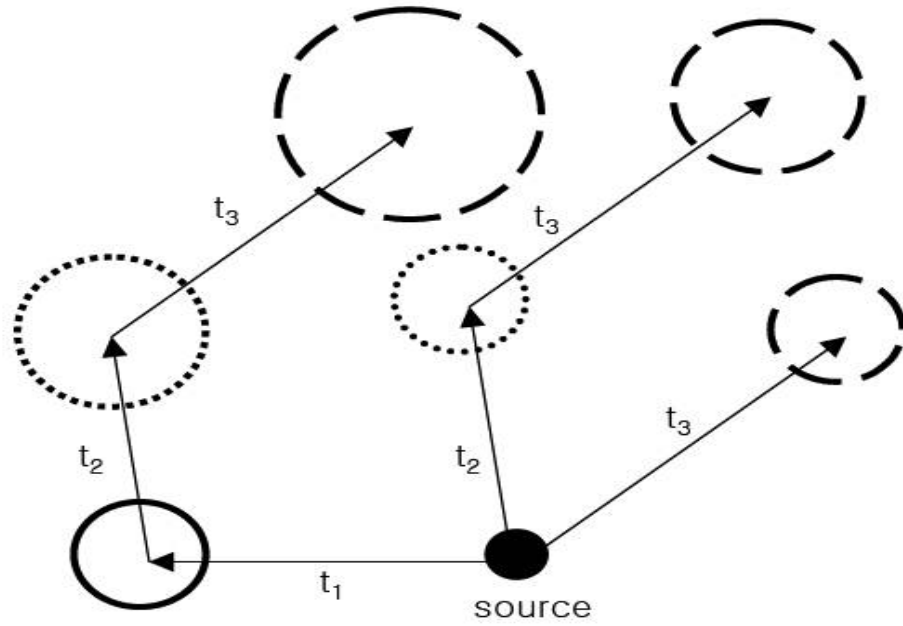


Fig. 1. Splitting process for a puff from the emission source at time.

2.1.2. 모델의 구성

Fig. 2 에 나타낸 CALPUFF modeling system을 보면, 이 모델 시스템은 진단적 방법(dignostic method)으로 기상을 처리하는 모델인 CALMET 모델과 대기 확산모델인 CALPUFF 모델 그리고 계산된 결과를 정리하기 위한 CALPOST로 크게 3부분으로 이루어져 있다.

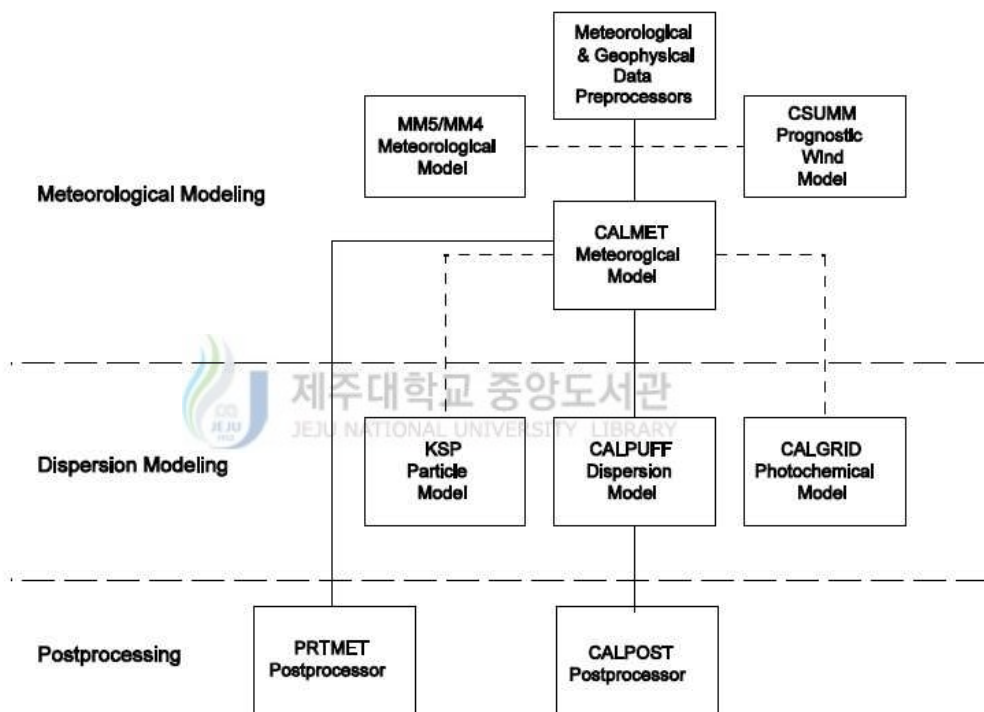


Fig. 2. Overview of CALMET/CALPUFF modeling system.

CALPUFF은 오염물질의 수송, 변형, 제거과정에 대해서 시·공간적 기상조건 의 변화 효과를 모사할 수 있는 다중층(multi-layer), 다종(multi-species) 비정상 상태 퍼프모델이다. CALPUFF는 CALMET에 의해 생성된 3차원 기상장을 사용할 수도 있다. CALMET 모델은 진단적인 기상장 생성 모듈과 육지 및 해상 경 계층 모듈을 가지고 있다. CALMET 모델은 CSUMN 진단 기상장 모델이나 객관

분석 과정을 통해 실측 자료를 포함하고 있는 MM5/MM4, WRF 모델에 의해 생성된 기상장을 결합시킬 수 있는 능력을 가지고 있다. CALPUFF 모델은 오염물질 제거(습성 침적, 건성 침적), 화학 변형, 연직 바람 쉬어항(Vertical wind shear), 해상 수송 및 해안 상호 효과(coastal interaction effects)와 같은 장거리 효과는 물론 빌딩 (downwash), 연기 상승(transitional plume rise), 부분적인 연기 침투(partial plume penetration), 세부 격자 규모의 지형 작용(subgrid scale terrain interactions)과 같은 단거리 효과를 위한 알고리즘을 포함하고 있다. 이는 자유롭게 변화하는 점오염원이나 격자화된 면오염원 배출원에 도움이 될 수 있다.



2.2 CALMET 모델

CALMET 모델은 지표기상 관측자료와 고층기상 관측자료를 공간적으로 내삽하여 격자점에서의 풍향, 풍속을 구하는 진단적 방법(diagnostic method)을 사용하여 시간 단위의 바람과 온도를 3차원 grid 기상장을 만드는 프로그램이다.

CALMET은 지형자료 및 토지이용도, 고층기상 관측자료와 지표기상 관측자료를 입력자료로 사용하며, 선택적으로 시간별 강수량, 예단적 방법인 MM4 및 MM5, WRF에서 생성된 기상예보자료등을 입력자료로 사용할 수 있다.

CALMET 모델을 수행하기 위해서 TERREL, CTGPROC, MAKEGEO, READ62, SMERGE, PMERGE의 전처리 프로그램을 수행하여 생성된 각각의 자료를 CALMET의 입력자료로 사용하며, 후처리프로그램인 PRTMET을 이용하여 생성된 기상자료를 분석, 평가하는데 사용할 수 있다..

CALPUFF를 실행하기 위해서는 기상자료가 필요하다. 기상자료는 지표기상자료와 고층기상자료, WRF 모델 결과를 활용하게 되는데, WRF 모델의 결과를 CALMET의 입력자료로 사용하기 위해서는 CALWRF 프로그램을 이용한 WRF 결과의 변환이 필요하다. 그 이유는 WRF의 수평격자체계는 Arakawa-C grid를 사용하여 온도, 비습 등의 스칼라 변수는 cross point에서 동서바람성분(u)과 남북바람성분(v)은 dot point에서 정의되지만 CALMET은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 각각의 격자 셀의 중심에서 grid point가 정의되는 non-staggered horizontal grid system을 사용하기 때문이다.

본 연구에서는 기상예측모델 WRF (Weather Research & Forecasting) 모델을 사용하였다. 기상모델은 물리법칙을 바탕으로 수치방정식을 계산해 나가면서 기상요소의 예측값을 산출해내는 예측모델이 있다. 기상모델에서 계산되는 자료 중 바람장 및 온·습도장은 모델링 결과인 오염물질의 농도분포에 결정적인 역할을 하기 때문에 정확한 계산이 필요하다는 바람장이 대기오염 물질의 이류 및 확산을, 온·습도장은 광화학반응을 결정하는 중요한 요소이기 때문이다(Sim, 2007).

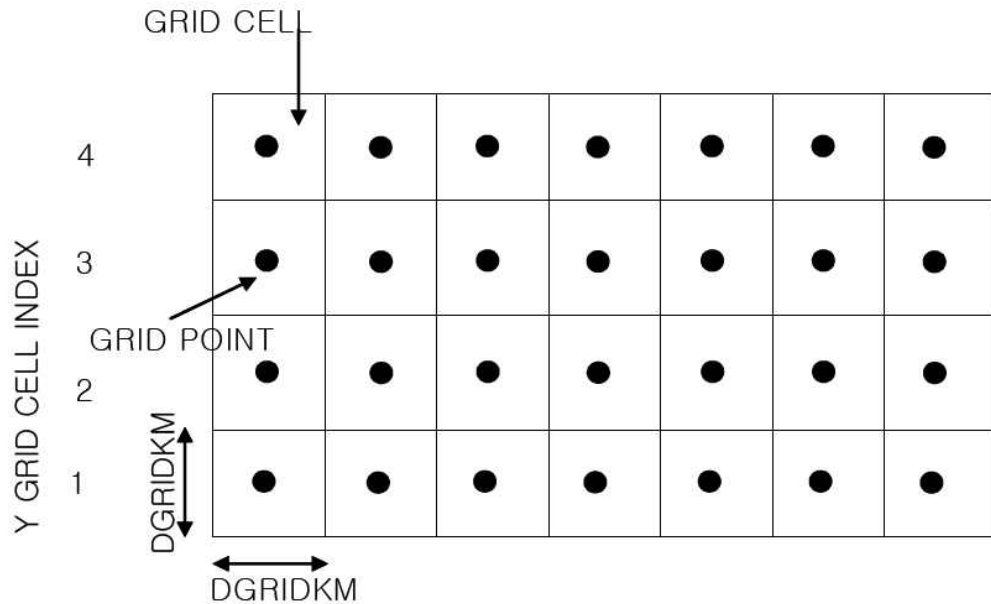


Fig. 3. CALMET non-staggered horizontal grid system.

이 모델은 1970년대 초반 미국 국립기상연구소(NCAR : National Center for Atmospheric Research)와 국립환경예측센터(NCEP : National Center for Environmental Prediction)에서 공동으로 개발한 모델로 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Research) 산하단체 NCEP과 AFWP(Air Force Weather Agency)에서 현재 실무적으로 활동되고 있는 기상모델이다. WRF모델은 Arakawa-C 격자체계를 사용하며, 연직격자로는 Eulerian 질량좌표계를 사용한다 (Skamarock et al., 2008).

WRF의 처리과정은 Fig. 4과 같다. WRF의 기본적인 구성은 전처리 과정인 WPS (WRF Preprocessing System)와 모델 수행단계 과정이다. WPS는 WRF 모델의 전처리 입력자료를 구성하고 있다. 1단계는 지형 및 토지피복도 자료로 지형경계자료 생성을 위해 GEOGRID로 예측하고 대상 영역을 설정하는 단계이다. 2단계는 UNGRID 초기 입력값을 등기압면의 기상자료로 생성된다. 그리고 3단계인 METGRID는 GEOGRID에 의해 입력된 모델 격자에 UNGRID에 의해 사용된 기상장을 이용하여 일정한 수평 격자점의 등기압면 자료를 내삽하는 단계이다.

WRF는 최종단계로서 2단계의 프로그램을 구성 하고 있다. WRF의 REAL은 WPS에서 전처리단계로 생성된 자료를 사용하여 진단적인 계산과 연직적 내삽과정을 통하여 자료를 재구성한 후 작업을 실시한다. 전처리 단계인 REAL 작업으로 얻어진 WRF의 초기값과 경계조건의 입력자료를 생성하게 되면 WRF에서 생성된 자료를 계산하여 지정된 날짜의 기상상태를 모사한다(Son, 2014).

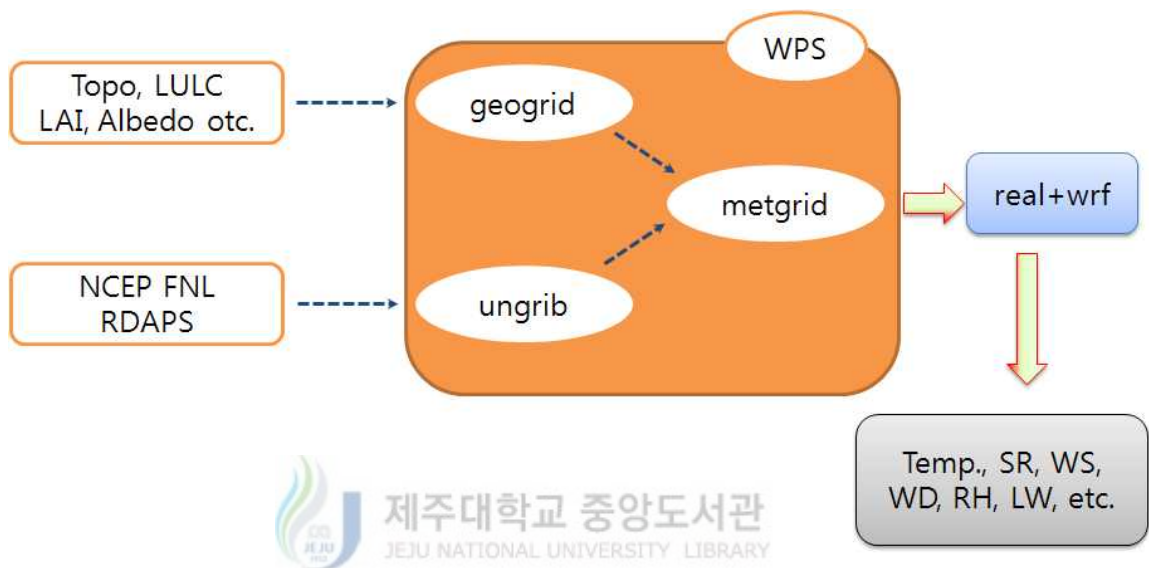


Fig. 4. Schematic Diagram of WRF process.

3. 연구방법

3.1. 연구대상지역

본 연구대상지역은 제주시 동부지역 일원인데, Fig. 5에서 보듯이 제주시 산북폐기물소각시설이 해발고도 500m 위치에서 운영되고 있으며, 삼양화력발전소, 그리고 소각시설 건설예정지 등도 포함되어 있다. 이도동과 연동 대기오염측정점 그리고 제주기상대 등이 포함되어 있다.

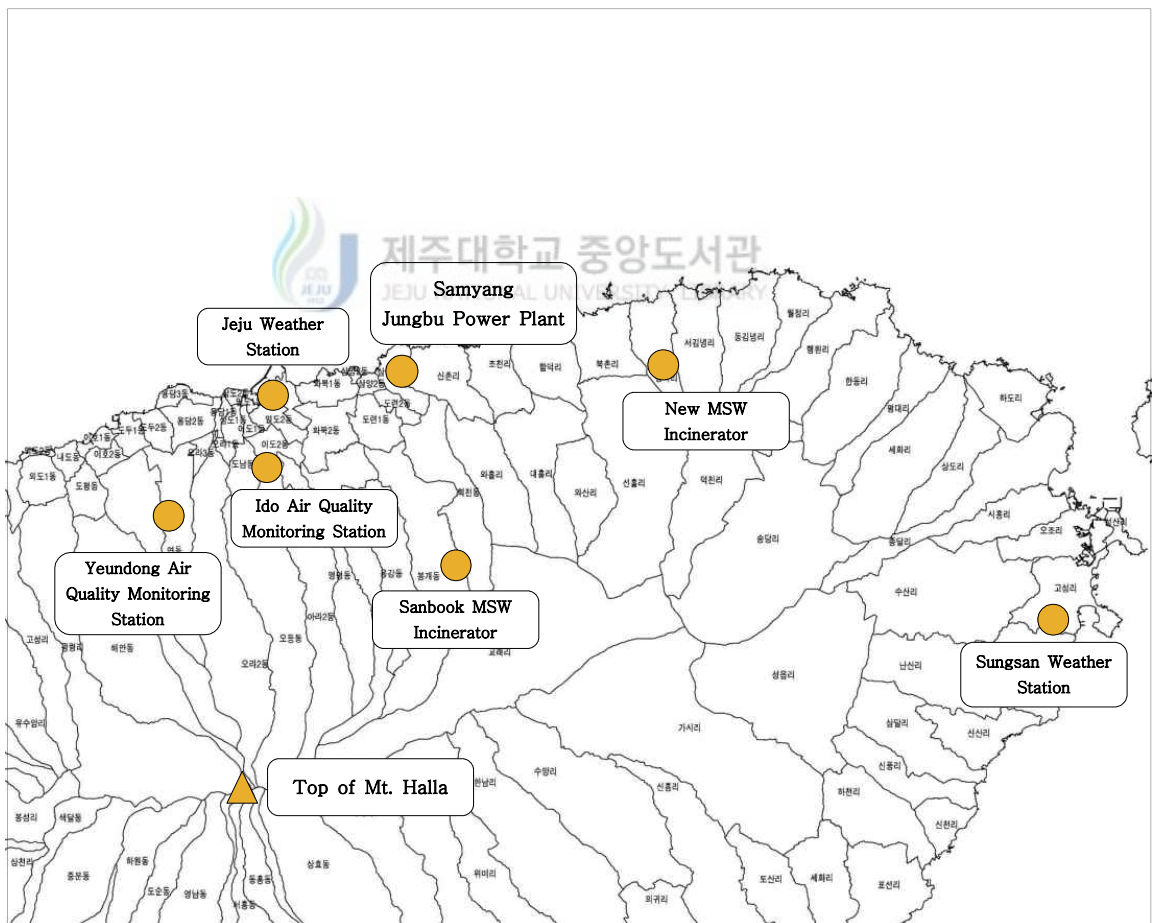


Fig. 5. CALPUFF Modeling Domain.

3.2. 모델 입력자료

CALPUFF 모델의 대상지역은 UTM좌표로 259km, 3688km 지점을 기준으로 하여 50km×40km로 선정하였는데, 이 대상 영역에 대한 구체적인 내용을 Table 1에 나타냈다. 그리고 모델링 대상지역의 지형적인 특징은 Fig. 6에 나타냈다.

Table 1. The Input data of modeling domain

Items		Input
Grid origin (reference point)	X(Easting)	259 km
	Y(Norting)	3688 km
Grid spacing(ΔX)		1 km
Domain Range	X(Easting)	259~309km (50km)
	Y(Norting)	3688~3728km (40km)
Domain Size	Nx(No. X grid cell)	50
	Ny(No. Y grid cell)	40
Projection		Universal Transvers Mercator(UTM)
UTM Zone		52(Northern)
No. of Vertical layers		8
Cell face heights(m)		0, 20, 50, 100, 200, 500 1000, 2000, 3000
Time zone		UTC+0900
Modeling Period		2013.01.01.~12.31
Continent/Ocean		Asia
Geoid-Ellipsoid		Korean Geodetic System 1995 : WGS 84
Region		South Korea
Datum		KGS

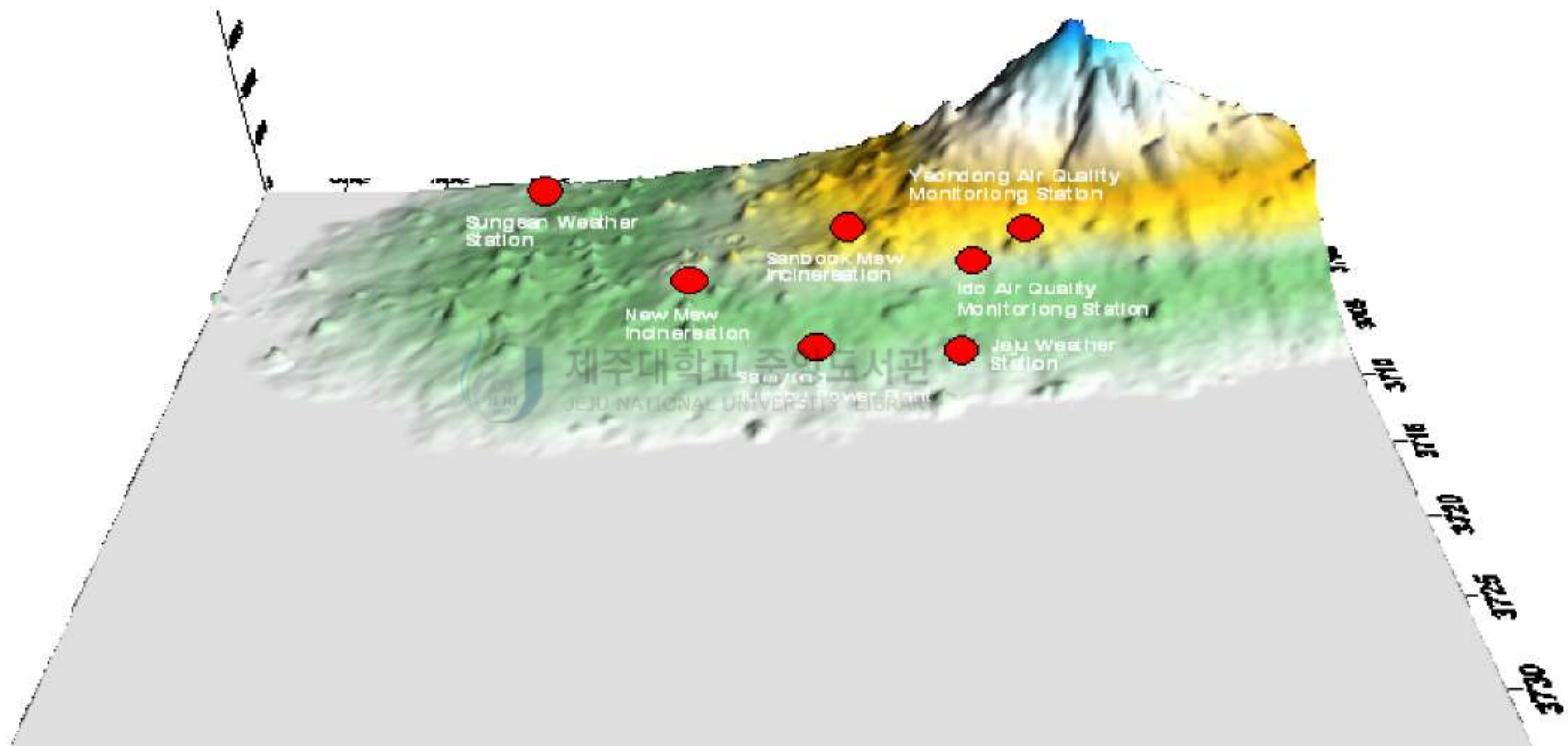


Fig. 6. Topography of modeling domain un sidered in this study.

CALPUFF 모델을 수행하기 위해서는 지형자료 및 기상자료와 대기오염물질 배출량이 필요하다.

가. 지형자료

본 연구에서는 미국지질조사소(United States Geological Survey, USGS)에서 제공하는 1 km 간격의 Land Use/Land Cover (LULC) Eurasia 지역의 토지이용자료와 90 m 간격의 SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission 3 arc-sec) Eurasia 지역 자료를 활용하여 지형자료를 생성시켜 사용하였다.

나. 기상자료

지표 기상 입력자료는 4개 기상관측소(제주, 성산, 서귀포, 고산)의 시간별 지표기상자료를 전처리 프로그램(SMERGE)으로 그리고 고층기상 입력자료는 고산관측소에서 고층관측자료를 전처리 프로그램(READ62)으로 처리하여 사용했다. 이러한 기상관측소에 대한 지리적 정보는 Table 2와 같다.



Table 2. Location of weather station

	Site	UTMx (km)	UTMy (km)	height (m)
	Jeju	270.9	3711.3	19.9
Surface Air	Sungsan	303.1	3695.8	18.6
Observation Station	Seogwipo	273.3	3681.6	50.5
	Kosan	236.2	3688.4	70.9
Upper Air	Same as Kosan station			
Observation Station				

본 연구에서는 중규모기상장 모델인 WRF의 결과도 사용하였는데, 연구대상지역에 대한 기상장을 산출해내기 위해서 Table 3과 Fig. 7에 보인 바와 같이 30 km, 10 km, 3 km, 1 km로 4개의 도메인을 구성하였으며, 최종 모델자료로 활용할 도메인 D04는 제주도 전역을 선정하였으며, 98 km×85 km, 격자간격 1 km로 구성하였다. 도메인 D04의 상세 기상자료는 CALPUFF의 기상장 전처리 모델인 CALMET을 수행할 경우 넓은 범위에 자료를 도출하도록 설정하였다. WRF 모델의 초기 및 경계조건은 자료의 시공간 해상도와 수집 용이성을 고려하여 NCEP에서 제공하는 FNL(Final) 전구

재분석 자료인 6시간 간격의 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 자료를 이용하였다(Son, 2014).

Table 3. Grid options used in WRF Model

Domains	D01	D02	D03	D04
Cells in x-direction	74	37	61	94
Cells in y-direction	61	55	58	85
Horizontal resolution(km)	30	10	3	1

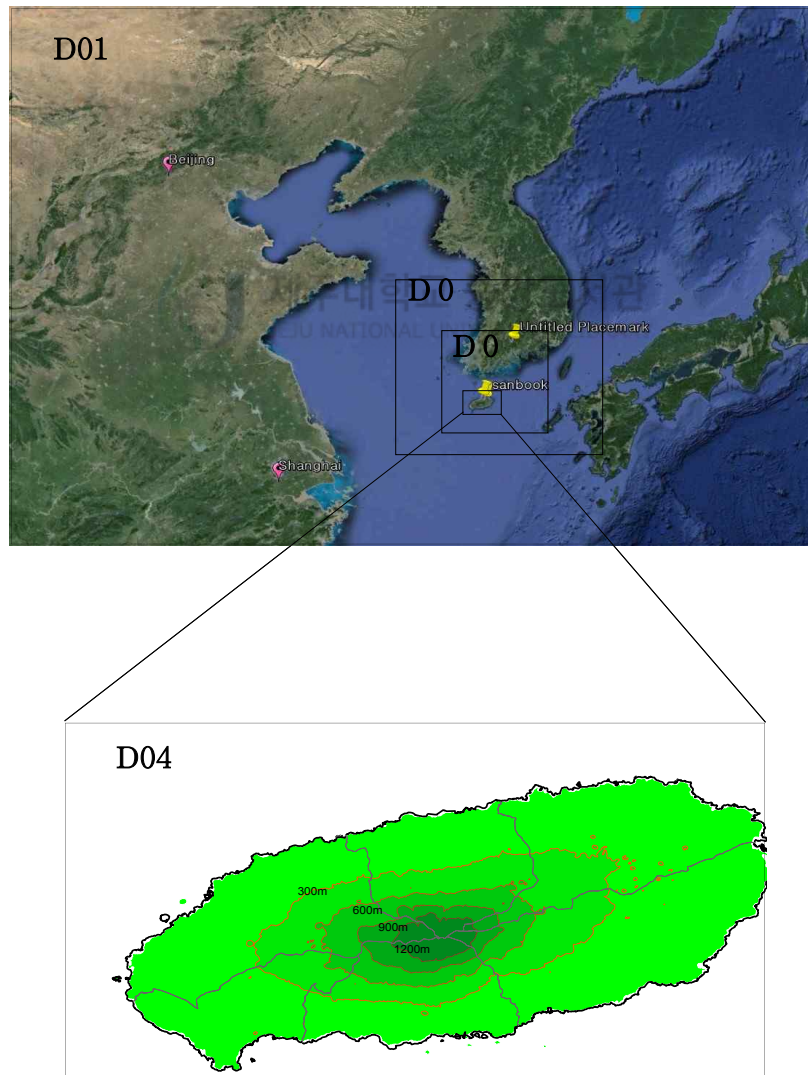


Fig. 7. The nested model domain for WRF simulations and topography of the domain 4.

다. 대기오염물질 배출량 자료

본 연구대상지역에서 배출되는 대기오염물질의 배출량 자료는 2010년 기준의 CAPSS 자료를 바탕으로 점(point), 면(area), 선(line) 오염원 배출량 자료와 향후 새롭게 설치될 계획인 폐기물소각시설에 대해서 적용한 배출량 자료를 각각 사용하였다. 여기서 대기환경기준이나 대기질자동측정소의 자료는 NO₂, PM₁₀이지만 CAPSS 등에서의 배출량 자료는 NO_x, 먼지(TSP)로 입력되어 있다. 따라서 모델 결과에 의한 NO_x와 TSP의 가중 농도는 각각 NO₂와 PM₁₀으로 간주하고 이를 대기환경기준과 대기질자동측정소 자료와 비교하였다.

Table 4에는 CAPSS 자료 중 본 연구대상지역내에 해당하는 면, 선 오염원에서 배출되는 NO_x와 먼지(TSP)의 배출량을 정리하여 나타냈다. CALPUFF에서는 면오염원과 선오염원의 입력격자수에 제한이 있기 때문에 본 연구에서는 1 km×1 km의 격자로 제공되는 CAPSS 자료를 5 km×5 km 격자로 재구성하여 입력자료로 입력하였다. 재구성된 입력자료에 대해서 Fig. 8에 구체적으로 나타냈다.

Table 4. Emission rates of NO_x and TSP from area and mobile sources applied to this study.

Type of source	NO _x (kg/yr)	TSP(kg/yr)
Area source	589,194	1,315,980
Mobile source	4,504,764	1,031,804
Total	5,093,958	2,347,784

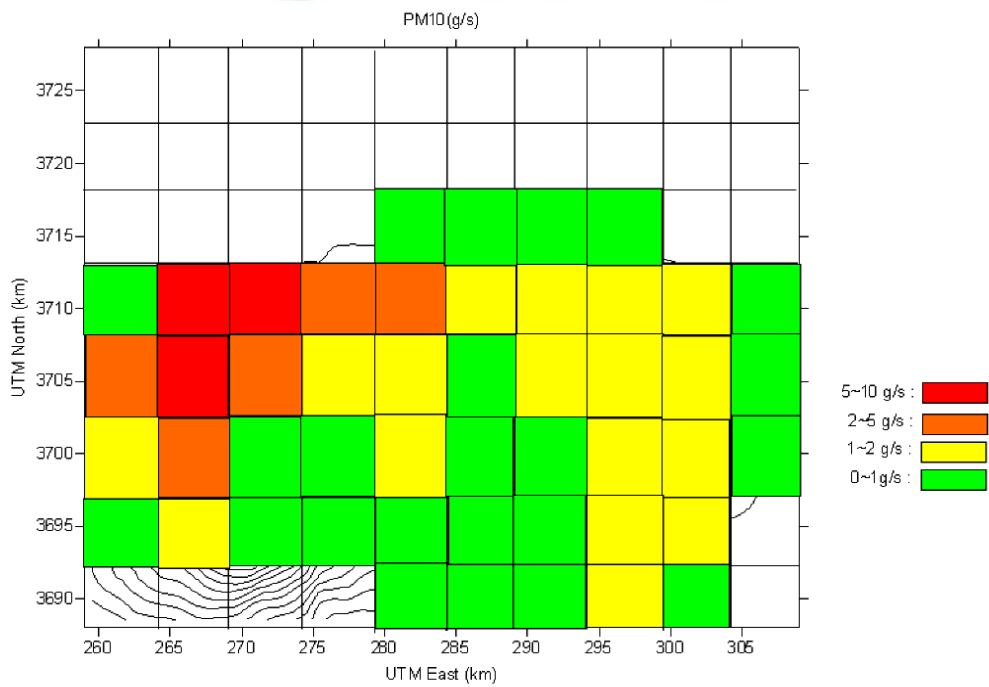
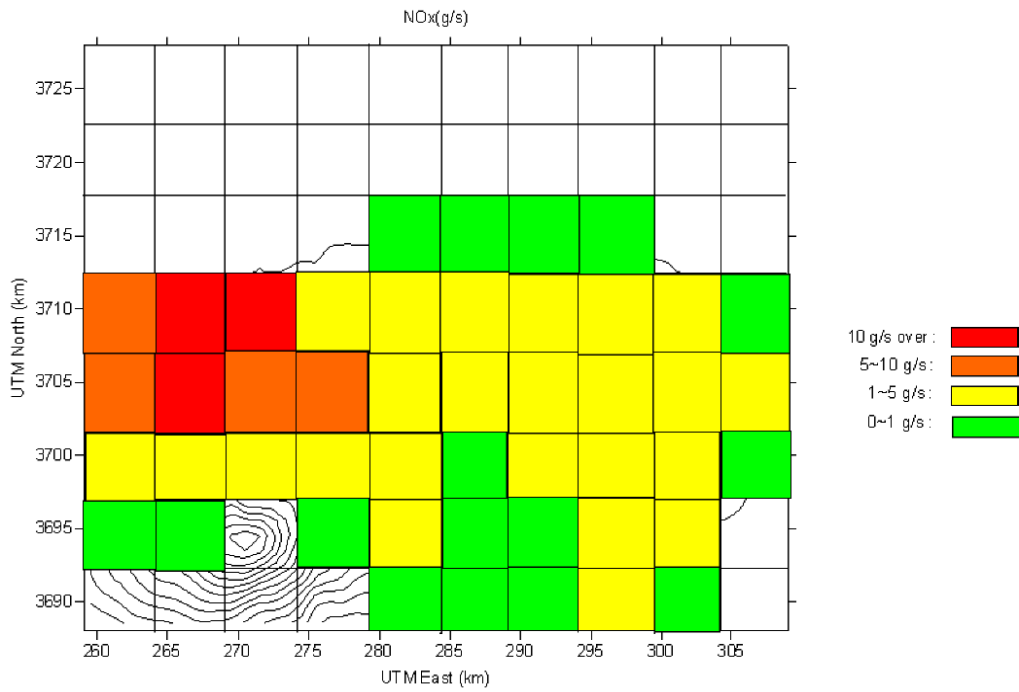


Fig. 8. Emission rates of NOx and TSP from area and line sources.

Table 5에는 연구대상지역 내에 위치하는 점오염원에 대한 CAPSS 자료를 정리하여 나타냈다. 본 연구대상지역 내에는 점오염원을 지닌 사업장은 2 곳이 위치하고 있다. 한 곳은 현재 운영중인 제주시 생활폐기물소각시설(산북소각시설)이며, 다른 한 곳은 중부발전의 화력발전소(삼양화력발전소)이다. 산북소각시설은 100 톤/일 규모의 소각로 2기가 가동 중이며, 연돌에 설치된 TMS를 이용하여 오염물질의 배출농도가 실시간으로 측정되어 제공된다. 그리고 삼양화력발전소의 경우에는 8개의 연돌이 위치하고 있으며, 이들 또한 TMS를 통해 오염물질의 배출농도가 실시간 감지되어 제공된다.

Table 5. Emissions of NO₂ and PM₁₀ from point sources applied to this study

Source		NO ₂ (g/sec)	PM ₁₀ (g/sec)	Stack height(m)	Temp. (°C)	Stack diameter (m)
Sanbook MSW Incinerator	#1	0.3866	0.0200	60	168	0.8
	#2	0.3653	0.0203	60	170	0.8
Samyang Jungnu Power Plant	#1	4.9763	0.1014	70	111	2.5
	#2	4.3834	0.1038	70	123	2.5
	#3	0.0018	0.0000	70	111	2.5
	#4	0.0014	0.0000	70	123	2.5
	#5	30.4976	0.2495	70	130	3.1
	#6	31.5685	0.2425	70	142	3.1
	#7	1.1795	0.0369	5	-	2
	#8	0.0162	0.0005	8	-	3.94

향후에 제주지역에서는 신규로 소각시설을 건설하고자 계획하고 추진하고 있는데, 소각시설의 규모가 구체적으로 확정되지는 않았으나 500 ton/day 이상 처리가 가능한 규모로 추진되고 있다. 따라서 본 연구에서 신규 소각시설은 500 ton/day 이상 처리가 가능한 시설로 가정하고 이의 제원을 설정하기 위해 현재 전국적으로 운영되고 있는 500 ton/day 이상 규모의 소각시설에 대한 제원을 조사하여 그 결과를 Table 6에 정리하였다. 본 연구에서는 신규건설될 소각시설의 제원으로 Table 6의 자

료를 사용하였다.

그리고 본 연구에서는 먼저 신규시설이 가동될 경우 먼저 배기가스 중 NO₂와 PM₁₀은 배출허용기준의 수준으로 운영된다고 가정하였을 때 그 영향범위를 파악하고자 했다. 다음으로는 이를 근거로 배출농도의 저감에 따른 영향범위의 변화를 제시하고자 했다. 저감농도는 현재 운영되는 전국의 동급 이상의 소각시설에 대한 배출농도를 목표로 설정하였다. 산복소각시설의 배기가스중 NO₂와 PM₁₀의 배출농도를 가정하기 위해 현재 전국적으로 500 ton/day 이상 소각시설에 대한 배출농도를 파악하여 Table 7에 정리했다. 현재 제주에서 계획중인 폐기물 소각시설과 규모가 비슷한 전국의 소각시설에서의 수원의 폐기물 소각시설의 배출자료를 본 연구에서의 저감목표로 가정하였다.

Table 6. Selected input data for stack conditions for New MSW facility

Type of pollution source	UTM coordinates		Stack height (m)	Stack diameter (m)	Exhaust velocity (m/sec)	Gas temp. (°C)
	X(km)	Y(km)				
point source	288.460	3711.126	100	1.0	24.47	200

Table 7. Emission of the existed Large-scale MSW incineration facilities

MSW incinerator (≥ 500 ton/day)	capacity (ton/day)		NO ₂ (g/sec)			PM ₁₀ (g/sec)		
	ton/day	No.	#1	#2	sum	#1	#2	sum
Suwon	300	2	1.86	1.82	3.68	0.081	0.070	0.151
Sungnam	300	2	1.06	0.95	2.01	0.049	0.042	0.091
Songdo	250	2	0.62	0.62	1.24	0.008	0.008	0.016


source : Operation of the National Waste Incinerators(2013)

Table 7에서 보듯이 같이 전국적으로 처리용량이 500 ton/day이상인 소각시설은 6 개소이었으나, 500~600 ton/day 수준인 소각시설에 대한 자료를 대상으로 하였다. 이들 세 소각시설의 평균배출량을 살펴보면 NO₂는 2.31 g/s, PM₁₀은 0.09 g/s으로 나타났고, 본 연구에서는 신규소각시설에 대한 목표저감농도로 활용하였다 다만, 500 ton/day의 용량이므로 통상 가동되는 소각로가 250 ton/day 규모를 2기를 가동하고 있으므로 본 연구에서도 2기로 가동할 것으로 예상하였다.

3.3. 대기질 자동측정망 자료

모델의 결과를 평가하기 위해 필요한 대기 중의 NO₂와 PM₁₀ 농도는 연구대상영역 내에 위치하는 대기질자동측정망의 자료를 활용하였다. 본 연구대상영역 내에 위치하는 대기질자동측정망에 대한 정보를 Table 8에 나타냈다. 연구대상지역내 2 곳의 측정소 자료에서 본 연구에서는 주로 이도동 측정소의 자료를 중심으로 활용하였다.

Table 8. Air pollution automatic monitoring station within the domain of this study.



Site name	UTMx	UTMy	location
Ido	267.818	3708.004	Jeju City Hall
Yeondong	270.110	3710.421	Office building of Jeju Province

4. 결과 및 고찰

4.1. 지역현황분석

가. 제주지역 기상개황

본 연구대상지역인 제주시의 최근 10년간 풍속자료와 강우자료를 정리하여 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9(a)에서 보듯이 겨울철의 12월에는 4.3 m/s 풍속으로 가장 높게 나타났고 여름철인 6월에 2.7 m/s로 가장 낮게 나타났다. 봄철인 4월에는 3.3 m/s로 나타냈다. 연간평균풍속은 3.3 m/s로 나타냈다. 그에 따른 바람장미를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10를 보면 연평균 풍향의 경우 북서(NW)풍이 11.3%로 우세하였고, 계절별로는 겨울에는 북서(NW)풍이 20.9%로 가장 우세하였다. 봄, 가을에는 북서(NW)풍이 약 10%정도로 나타났고, 여름에는 북북동(NNE)풍이 13% 정도의 빈도를 나타냈다.

Fig. 9(b)에 나타낸 것은 10년간 제주시 지역에 연평균 강우량을 나타내었다. 그림에서 보듯이 8월에는 297.4 mm로 가장 높은 수치의 강우량이 나타났고 1월에 54.4 mm로 가장 낮은 강우량을 나타냈다. 제주시 지역에 강우량 대부분 여름철에 많은 양의 강우량을 나타냈으며, 겨울철인 1월~2월, 12월에 가장 낮은 강우량이 나타났다. 그림에서 8,9월에 강우량이 크게 높아짐은 이 시기에 태풍이 집중되므로 인해 강우량이 높아진 것으로 판단된다. 최근 10년동안 우리나라에 영향을 미친 태풍자료를 보면(<http://typ.kma.go.kr>), 2003년부터 10년간 총 29회의 태풍이 영향을 미쳤는데, 이중 18회가 8월과 9월에 영향을 미친 것을 알 수 있다. 6월과 7월에는 장마기간이 형성되면서 평균적으로 약 170~180 mm 강우량을 보였다. 그리고 10년동안 연평균 126.2 mm에 강우량이 나타났는데 6~9월에서만 연평균 이상에 강우량을 나타냈다. 따라서 6월에서 9월사이에는 강수로 인한 대기오염물질의 습성침적을 고려해야 할 것이다.

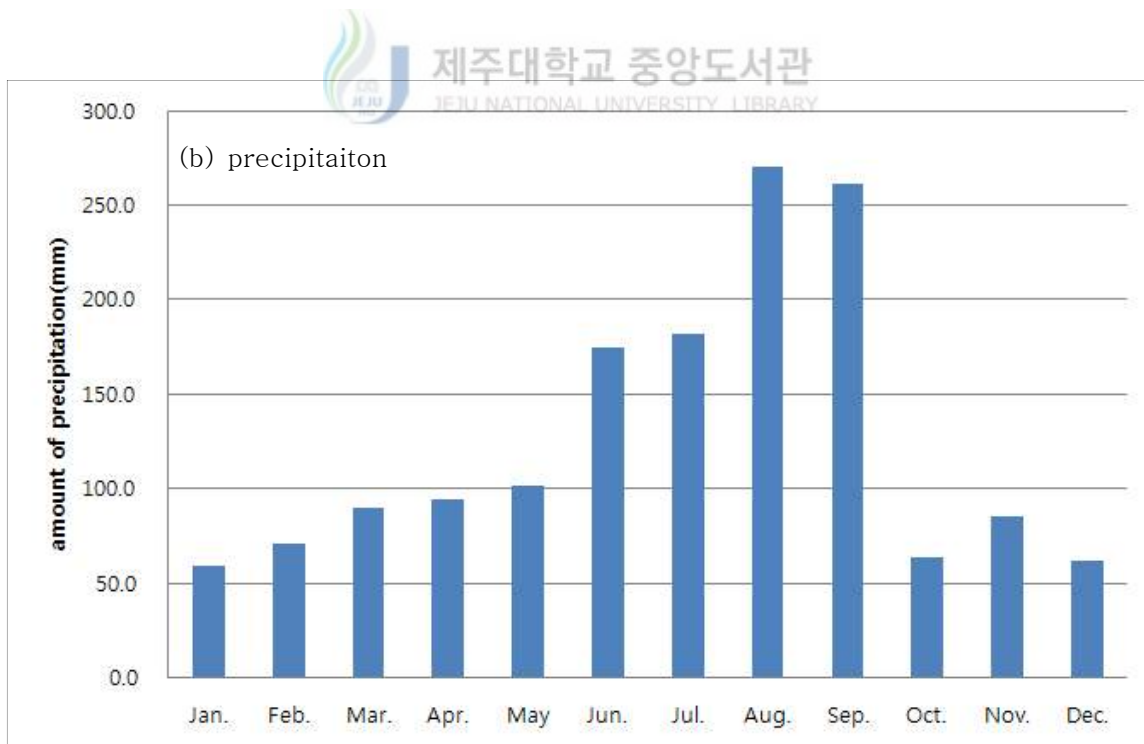
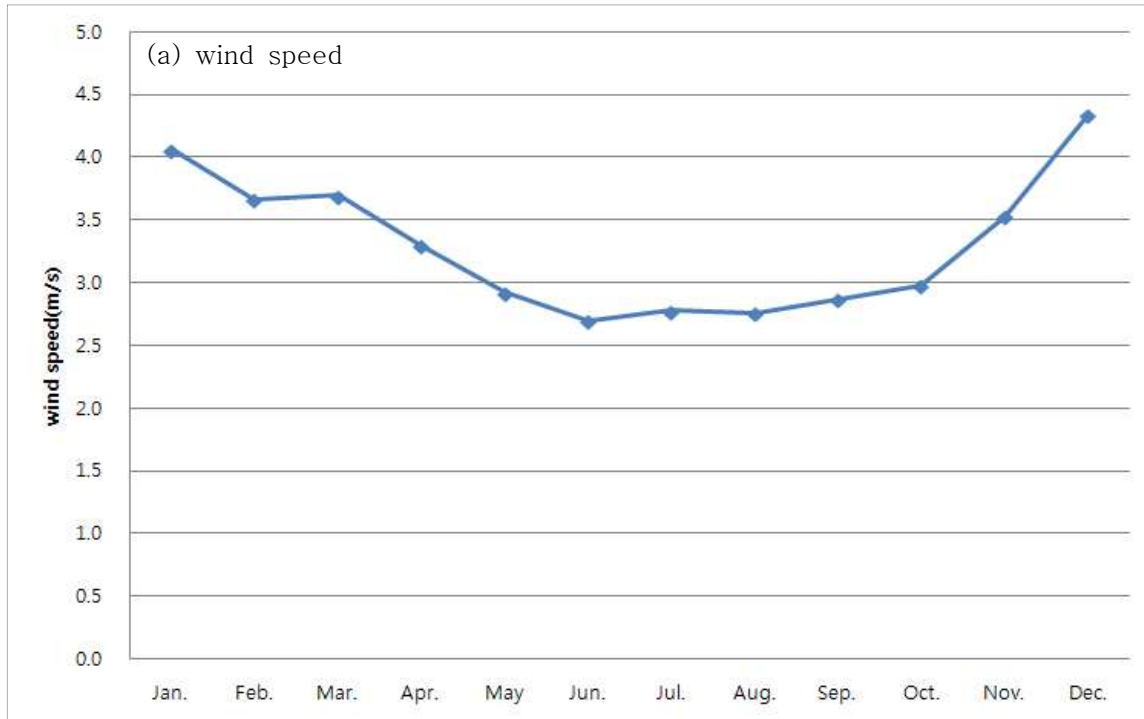


Fig. 9. Monthly averages of wind speed(a) and precipitation(b) during the last ten years.

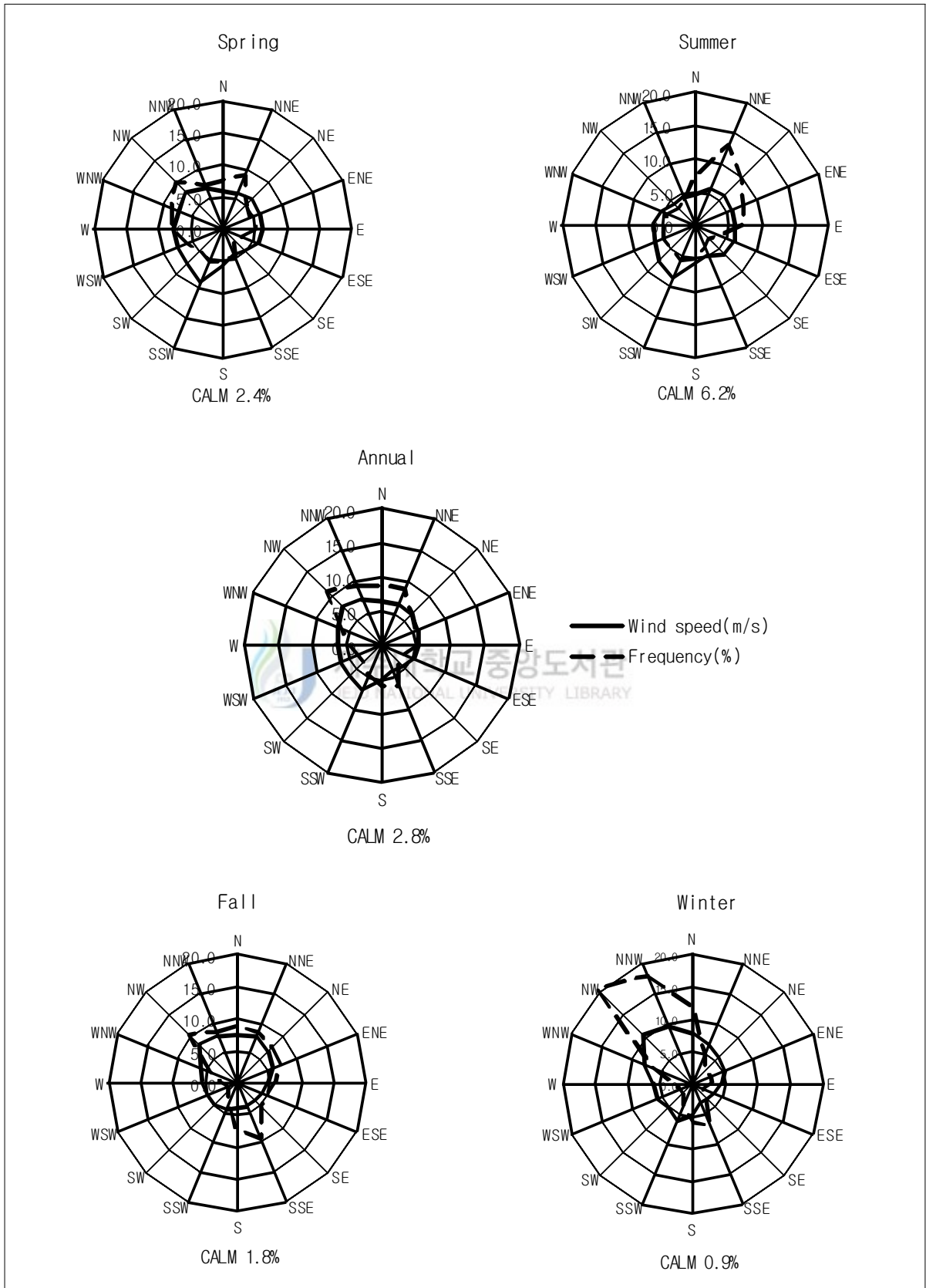


Fig. 10. Wind rose at Jeju city during the last ten years.

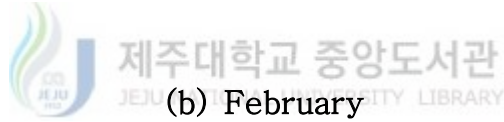
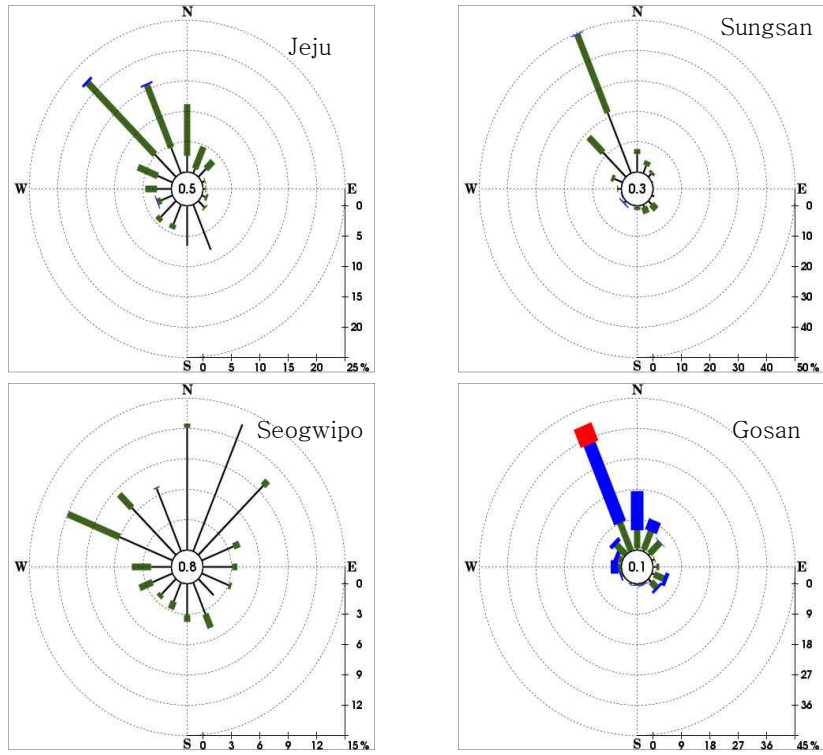
연구대상지역인 제주도에서 4개의 기상관측소에서 지난 2013년 각 월별로 측정된 바람을 분석하였다.

Fig. 11에는 1월과 2월 바람장미를 나타냈다. 그림에서 보듯이 1월과 2월에는 제주와 성산 그리고 서귀포의 바람장미의 형태가 아주 비슷함을 알 수 있다. 특히 성산 기상대의 지상풍을 보면 NNW의 바람이 아주 자주 불었고, NW의 발생빈도도 높음을 볼 수 있다.

Fig. 12에는 3월과 4월의 바람장미를 나타냈다. 그림에서 보인 바와 같이 3월과 4월에 성산 기상대에서 관측된 지상풍은 1, 2월에 비해 강한 NNW 바람의 빈도가 높게 나타나고 있을뿐만 아니라 겨울철에 비해 WSW와 SW 바람의 빈도도 높아짐을 알 수 있다. 그리고 제주 기상대의 바람을 보면 북서계열의 바람도 자주 불었지만 1월과 2월에 비해 남서 계열의 빈도와 풍속이 증가하고 있고 북동 계열의 바람도 그 빈도가 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig. 13 5월과 6월의 바람장미를 보인 것이다. 먼저 성산기상대의 바람장미를 살펴 보면, 5월에는 4월과 마찬가지로 여전히 NNW이 주풍향을 나타내고 있으며, 남서계열바람과 동풍바람의 출현빈도가 크게 증가함을 알 수 있다. 성산기상대의 6월 바람장미를 보면 5월과는 다소 다른 양상을 보이고 있는데, 북동계열의 바람이 주풍향을 나타내고 남서계열과 동풍의 빈도가 크게 낮아짐을 볼 수 있다. 그리고 서귀포 기상대의 바람장미를 보면 5월에는 ENE, E와 WSW, W 바람의 발생빈도가 4월 이전과는 달리 크게 증가하였고, 6월에는 ENE 바람이 거의 대부분을 차지함을 볼 수 있다. 그리고 제주기상대의 바람을 보면 5월에는 서풍과 동풍의 출현빈도가 높고 6월에는 NE~E 계열의 바람이 대부분을 나타냄을 알 수 있다. 이런 5월과 6월의 바람장미를 보면 풍향과 풍속에 있어서 다소 차이를 보이는 것으로 생각된다.

(a) January



(b) February

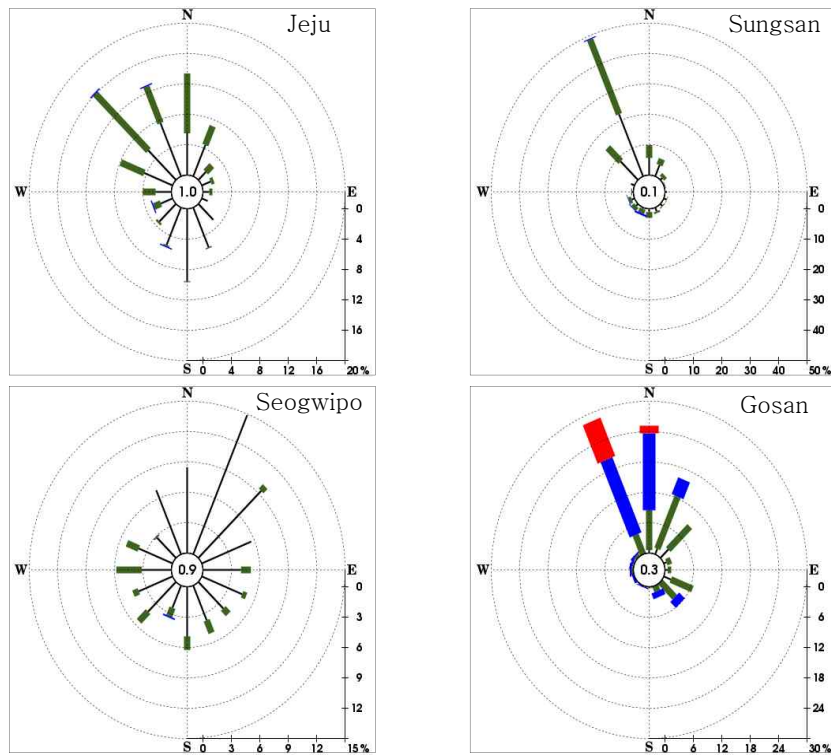
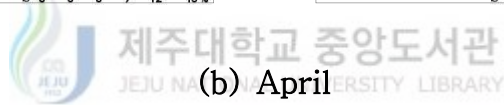
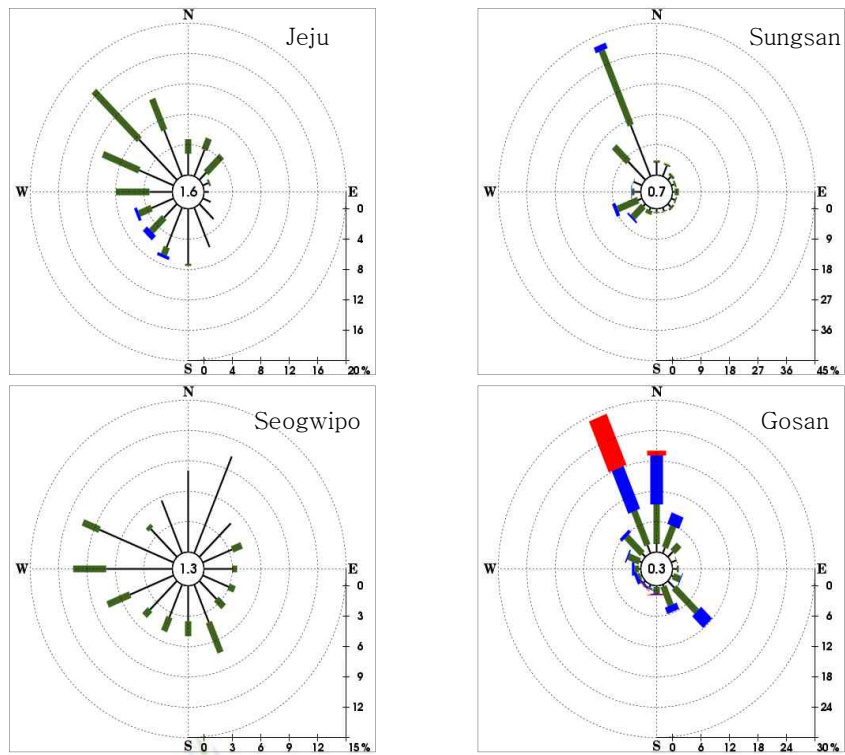


Fig. 11. Wind rose measured at each weather station for January and February.

(a) March



(b) April

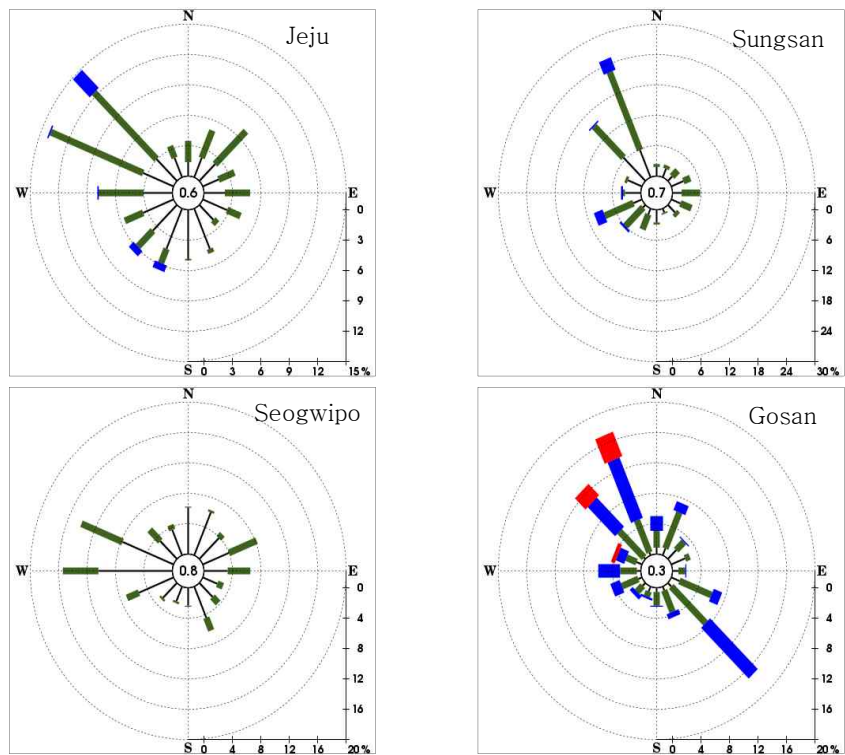
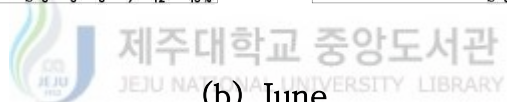
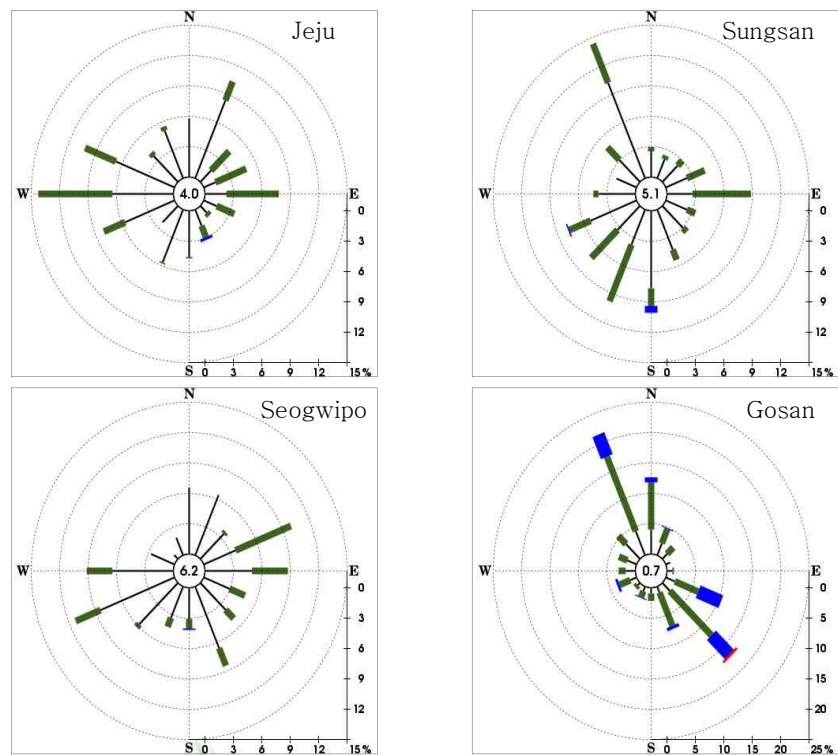


Fig. 12. Wind rose measured at each weather station for March and April.

(a) May



(b) June

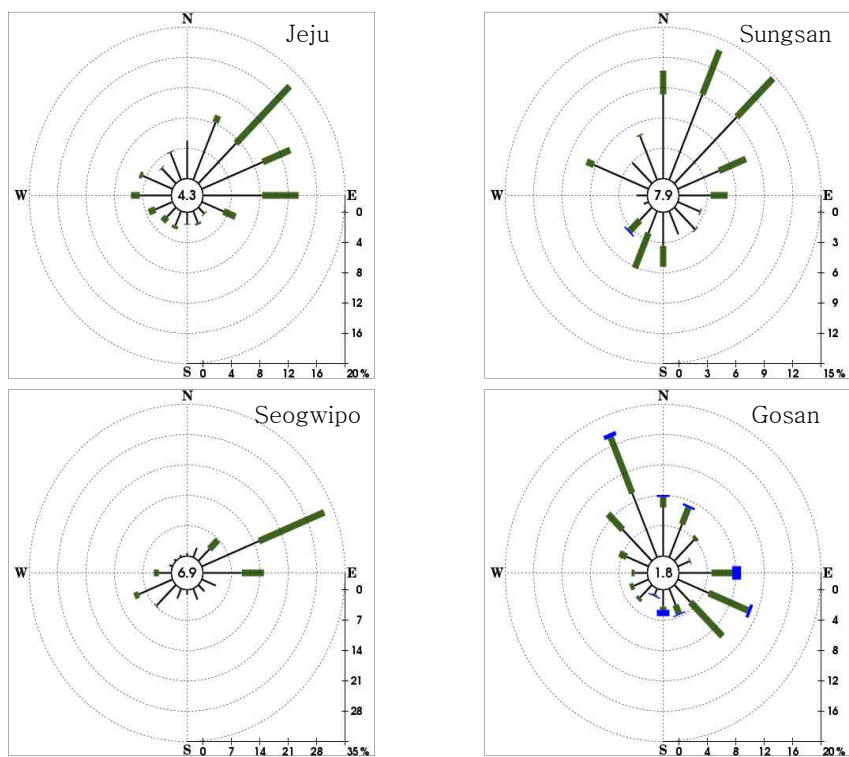


Fig. 13. Wind rose measured at each weather station for May and June.

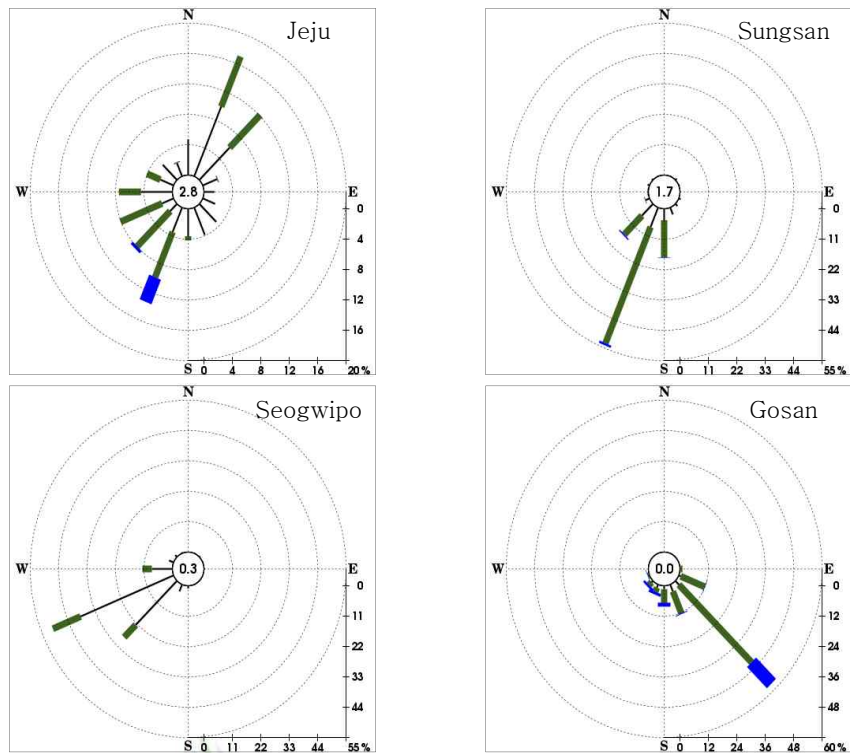
Fig. 14에는 7월과 8월에 대한 바람장미를 나타냈다. 그림에서 7월과 8월에 대한 성산지역의 바람장미를 보면 7월에는 전부 남서계열의 바람이었고, 8월에는 SW~S 계열의 바람이 거의 대부분이었지만 NW 바람도 비교적 많이 출현한 것으로 나타났다. 서귀포의 경우 7월과 8월에는 거의 SW 계열의 바람만 불었다. 제주시에서는 7월에는 NNE 바람이 주풍향을 보이지만 남서계열의 바람이 많이 출현하였고, 8월에는 남서계열의 바람이 7월에 비해 빈도와 풍속이 현저하게 약화됨을 볼 수 있다.

Fig. 15에는 9월과 10월의 바람장미를 나타냈다. 그림에서 보듯이 9월과 10월에 성산지역에서 WNN바람이 주풍향을 나타내고 있지만 7월과 8월과는 달리 남서계열 및 남동계열의 바람은 거의 불지 않고 NW 및 NE계열의 바람만 출현하는 것을 볼 수 있다. 그리고 서귀포에서는 대부분 NE 계열의 바람이 출현하였으며, 제주시에서도 NE 계열의 바람이 주로 발생하였고 일부 NW 계열의 바람도 나타나고 있다.

11월과 12월의 바람장미를 Fig. 16에 나타냈다. 11월과 12월에 성산지역은 WNW이 주풍향을 나타내고 그 외의 풍향에 있어서는 출현빈도가 낮게 나타남을 볼 수 있다. 서귀포시에는 NW 및 WNW 바람의 빈도가 높았고 풍속도 비교적 강해지는 것으로 나타났다.



(a) July



(h) August

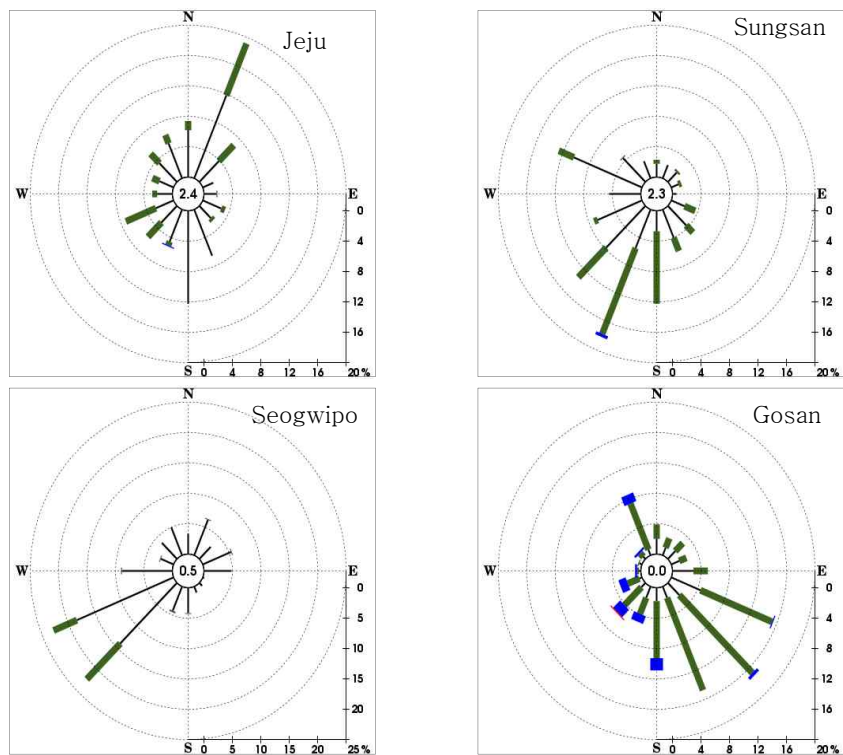
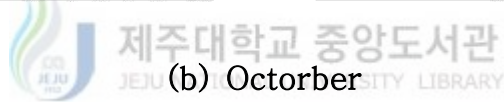
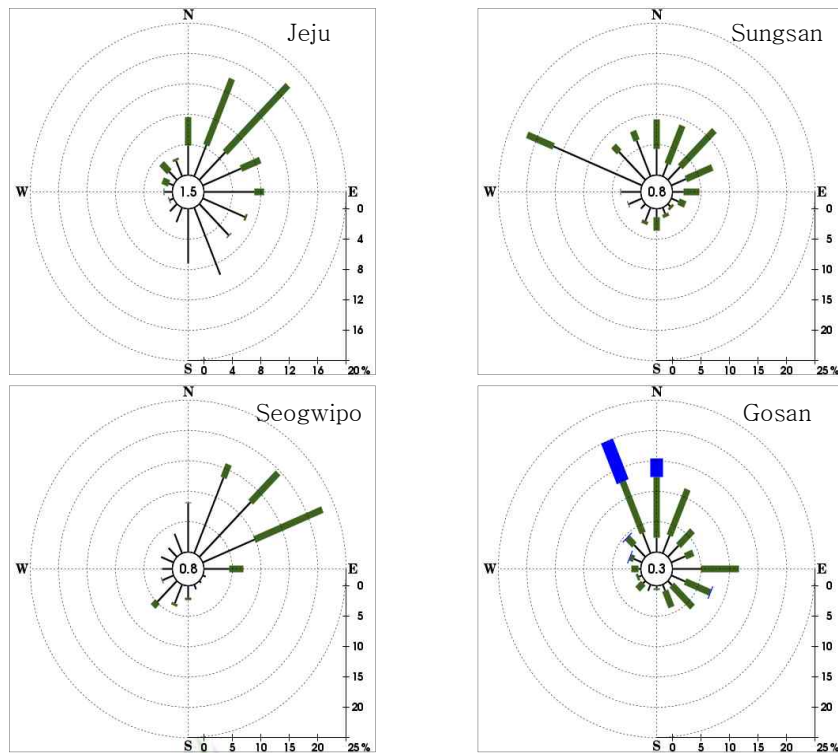


Fig. 14. Wind rose measured at each weather station for July and August.

(a) September



(b) October

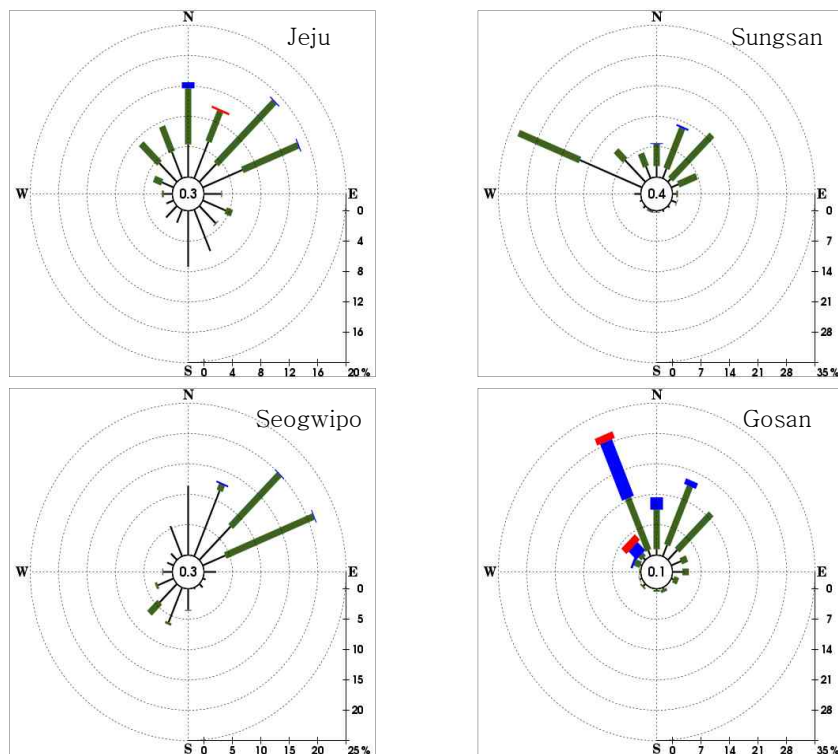
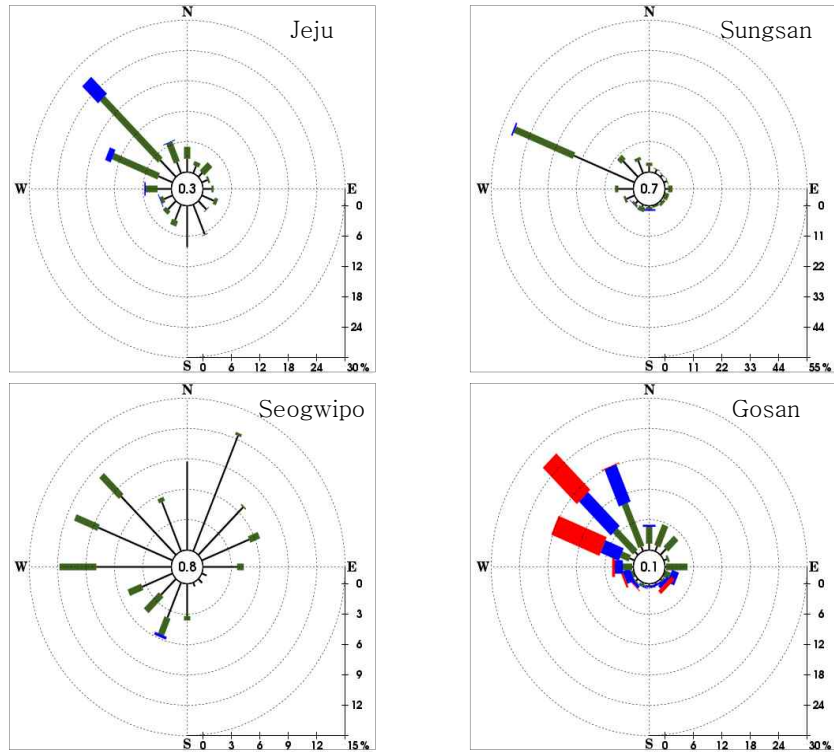


Fig. 15. Wind rose measured at each weather station for September and October.

(a) November



(b) December

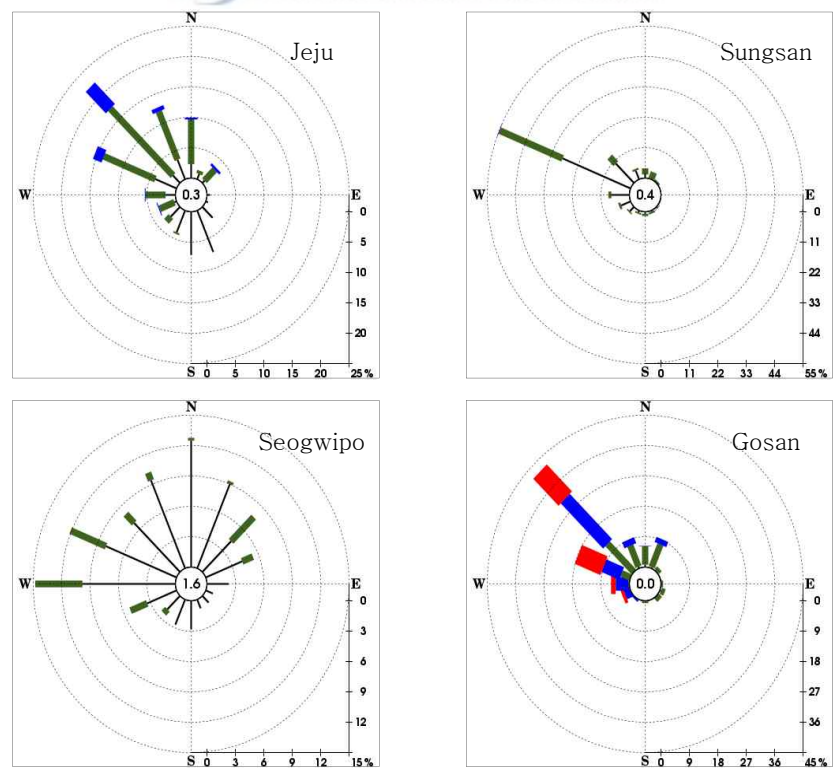


Fig. 16. Wind rose measured at each weather station for November and December.

나. 연구대상지역 대기질 현황

Table 9는 본 연구대상지역인 제주시 이도동 대기질자동측정망에서 2013년 측정된 NO₂와 PM₁₀의 월별평균 농도와 최고농도의 값을 나타냈다. 가스상 물질인 NO₂를 보면 1~3월에 월평균농도값이 높게 나타났고 9월에 가장 낮게 나타난 것을 볼 수 있다. 계절로 보면 봄철(3~5월)과 겨울철(1~2월, 12월)에 다른 계절보다 높게 나타남을 알 수 있다. 최고농도는 3월에 나타났다. NO₂의 연평균 농도는 10 ppb 이었다.

입자상물질인 PM₁₀의 측정농도값을 보게 되면 월평균 최고농도가 5월에 나타났으며 최저농도는 8월에 나타났다. 계절로 보면 여름철(6~8월)을 제외한 다른 계절에서는 상대적으로 높은 농도값을 보이고 있다. 최고농도값으로는 11월에 최고 농도값이 290 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 연평균 농도는 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내고 있다.

이처럼 6월에서 9월까지의 대기오염물질의 농도수준이 다른시기보다 비교적 낮은 것은 이 시기에 강우량과 깊은 관련이 있는 것으로 생각된다.

Table 9. Summary of air quality data at Ido Automatic monitoring station during 2013

Month	NO ₂ (ppb)		PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Ave.	Max.	Ave.	Max.
Jan.	14	48	40	217
Feb.	14	47	32	188
Mar.	14	68	53	231
Apr.	12	59	47	156
May	13	48	61	170
Jun.	9	50	37	128
Jul.	9	30	29	106
Aug.	7	35	28	103
Sep.	5	25	33	124
Oct.	7	35	42	283
Nov.	11	45	53	290
Dec.	13	53	47	222
Annual	10	58	41	290

4.2. 대기오염물질의 확산범위 예측

가. 월별 대기오염물질의 확산 형태

제주도에 위치하는 4개소의 기상관측소에서 관측된 지상 일기상통계자료와 고층 기상관측자료를 사용하여 CALPUFF모델에서 신규 폐기물소각시설이 현재의 배출허용기준 수준으로 대기오염물질을 배출한다고 가정하여 모델링한 대기오염물질의 농도장을 바탕으로 신규로 건설될 폐기물소각시설에서 배출될 대기오염물질의 확산방향과 범위를 분석하였다.

Fig. 17과 Fig. 18은 1월과 2월의 기상상태에서 예측된 NO_2 와 PM_{10} 의 연기 분산 범위를 보인 것이다. 폐기물 소각시설의 배출구에서 배출된 NO_2 와 PM_{10} 은 제주도 동부지역으로 광범위하게 확산되어 나가는 형태를 보임을 알 수 있다. 1월과 2월의 동절기에 소각시설의 배출구에서 배출되어 남동방향으로 부채꼴로 퍼져나감을 볼 수 있다. 그 분산 양상은 NO_2 와 PM_{10} 이 거의 유사한 형태를 보임을 알 수 있다.

Fig. 19에는 1월과 2월 폐기물 소각시설이 위치한 곳에서 예측된 바람장미를 보인 것이다. 이곳에서 예측된 1월과 2월의 바람을 보면 주풍향이 NNW로 1월에는 25%, 2월에는 17%빈도를 나타냈으며, 2등급(1.8~3.4 m/s)과 3등급(3.4~5.4 m/s) 바람의 빈도가 많은 것을 볼 수 있다. 다음으로 NW와 N풍 빈도가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 1월과 2월의 바람은 NW~N풍 계열의 건설될 소각시설 예정지에서 바람이 대부분을 차지할 것으로 예측되었다. 이에 따라 Fig. 17과 Fig. 18과 같은 대기오염물질의 분산형태를 보인 것으로 판단된다.

이러한 바람상황과 연기분산 형태에서 1월과 2월에 일일 최고 지상농도가 나타난 지점을 살펴보면 Fig. 20과 같다. 1월과 2월에는 소각시설 인근의 A와 B 그리고 C와 D 지역에서 높은 지상농도를 보일 것으로 예상되었다.

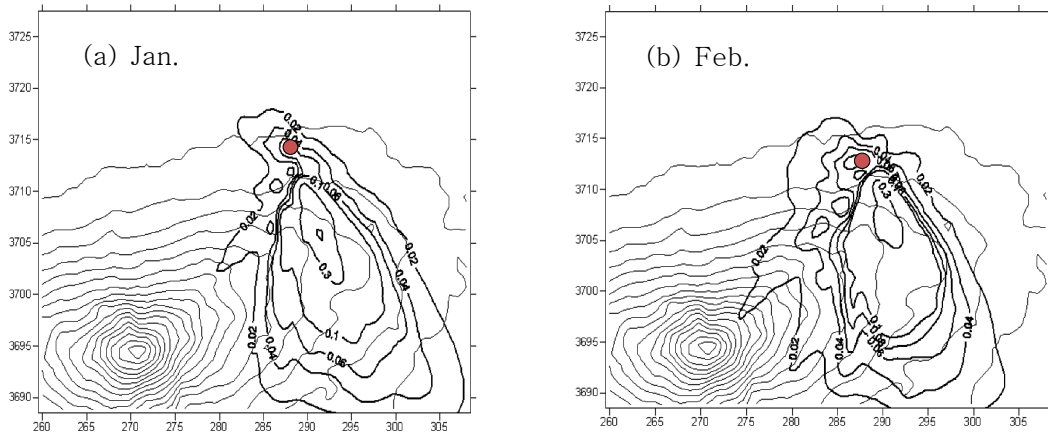


Fig. 17. The contour of NO₂ concentration modeled for January and February

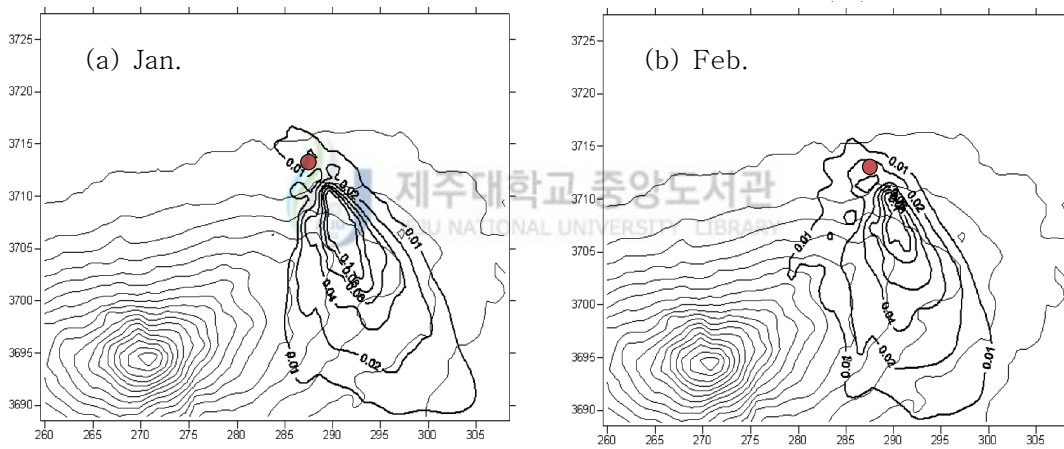


Fig. 18. The contour of PM₁₀ concentration modelled for January and February

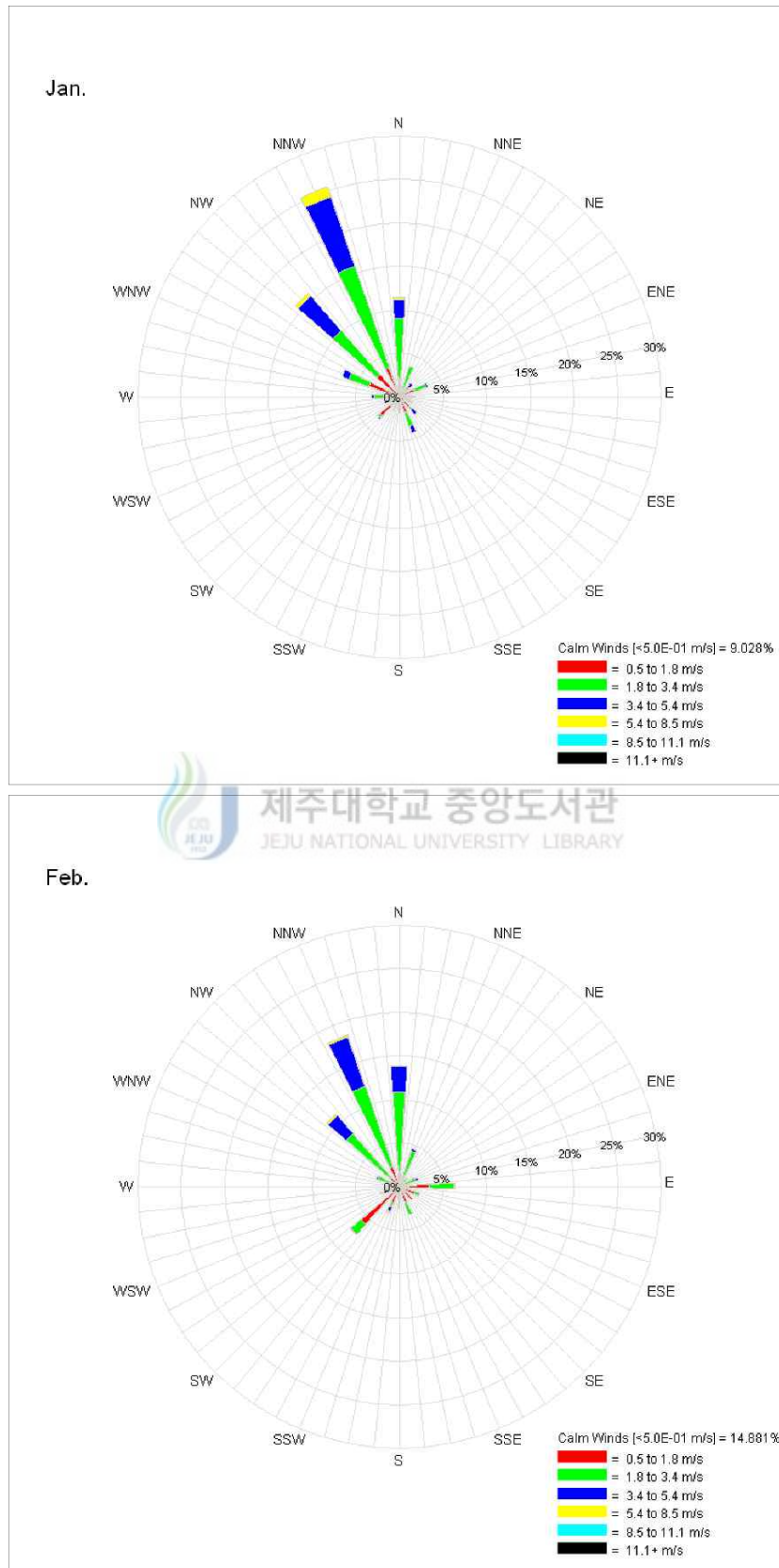


Fig. 19. wind rose predicted for Jan. and Feb. at the site of New MSW incinerator.

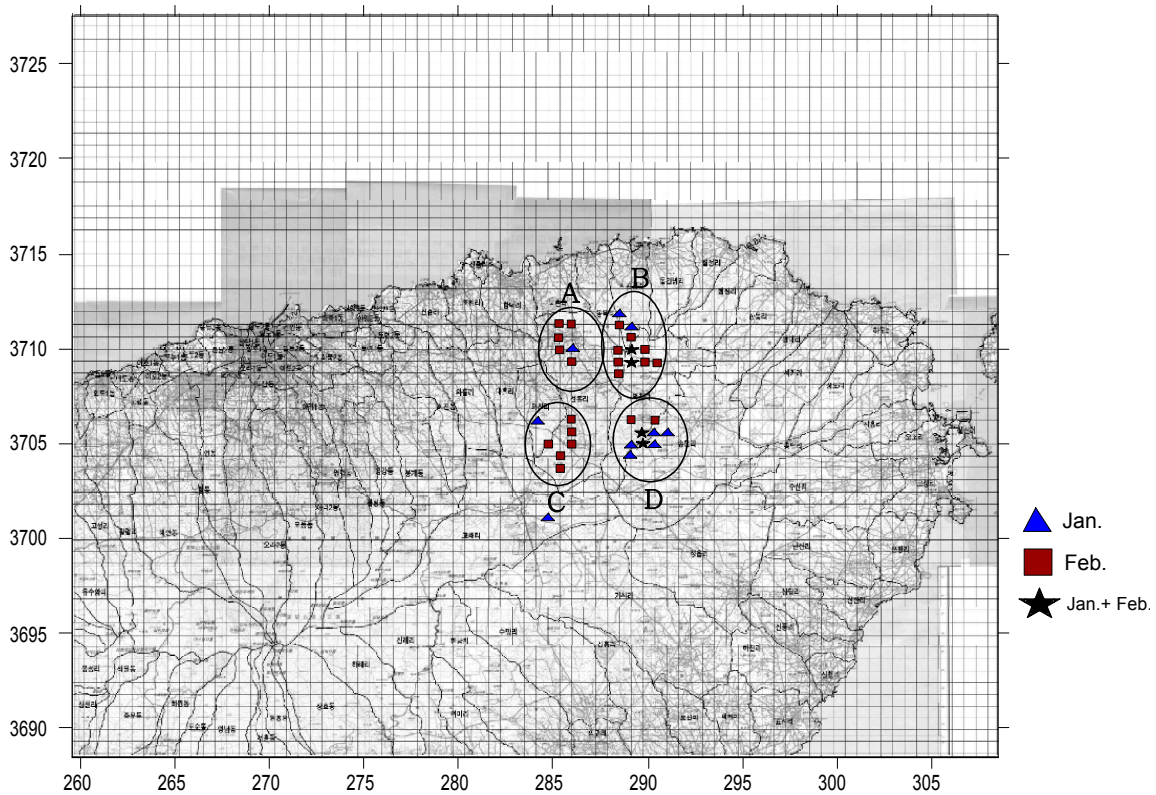


Fig. 20. The position of daily max. ground level concentration of NO_2 and PM_{10} modelled for January and February.

Fig. 21과 Fig. 22는 3월과 4월의 기상상황에 대해 예측된 NO_2 와 PM_{10} 의 연기 분산 범위를 나타낸 그림이다. 폐기물 소각시설의 배출구에서 배출된 대기오염물질이 남동방향으로 비교적 넓게 그리고 길게 확산되어 나감과 동시에 배출구를 중심으로 남서 및 북동방향으로도 확산되어 가는 T자형 분산형태를 보였는데, NO_2 와 PM_{10} 의 분산형태가 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 23은 폐기물 소각시설이 건설될 위치에서 3월과 4월에 예측된 바람장미를 보인 그림이다. 그림에서 보듯이 3월에는 NNW와 SW 바람이 15%이상으로 빈도를 나타냈다. 그리고 NW와 WSW 바람의 빈도도 꽤 나타남을 볼 수 있다. 4월에는 NW와 SW의 바람의 빈도가 각각 13%정도로 높았으며 WNW와 WSW 바람도 비교적 빈도가 높았으며, ESE 바람도 간혹 부는 것으로 나타났다. 이러한 바람의 분포로 인해 3월과 4월에 오염물질의 분산형태가 서로 유사하면서도 4월에 동서방향으로 보다 넓은 범위로 분산되는 것으로 생각된다.

Fig. 24는 3월과 4월에 대해서 일일 최고지상농도가 나타날 것으로 예상된 곳을 나타냈다. 3월과 4월에는 주로 B와 D지역에서 지상최고농도가 자주 나타날 것으로 예

상되었다. 그리고 3월이 4월에 비해 지상 최고 농도가 예상되는 지점은 신규 폐기물 소각시설을 중심으로 보다 산발적으로 나타남을 볼 수 있다.

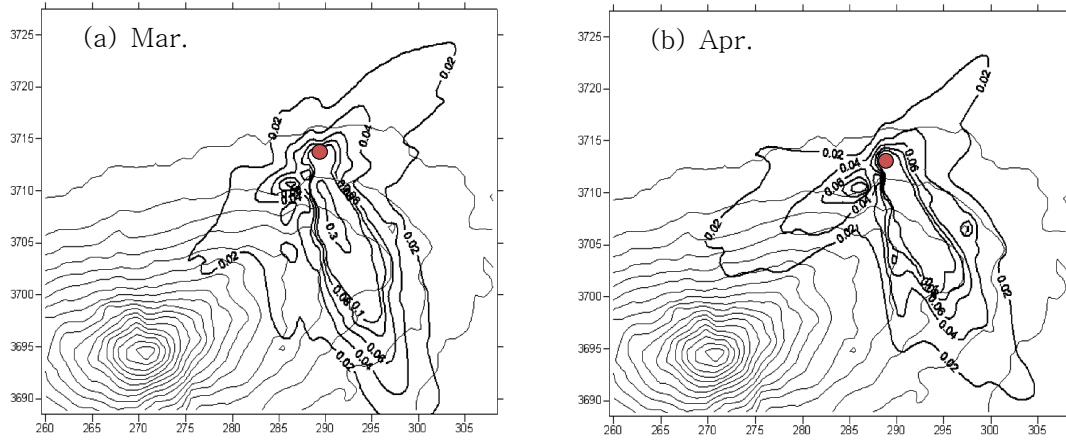


Fig. 21. The contour of NO₂ concentration modelled for March and April.

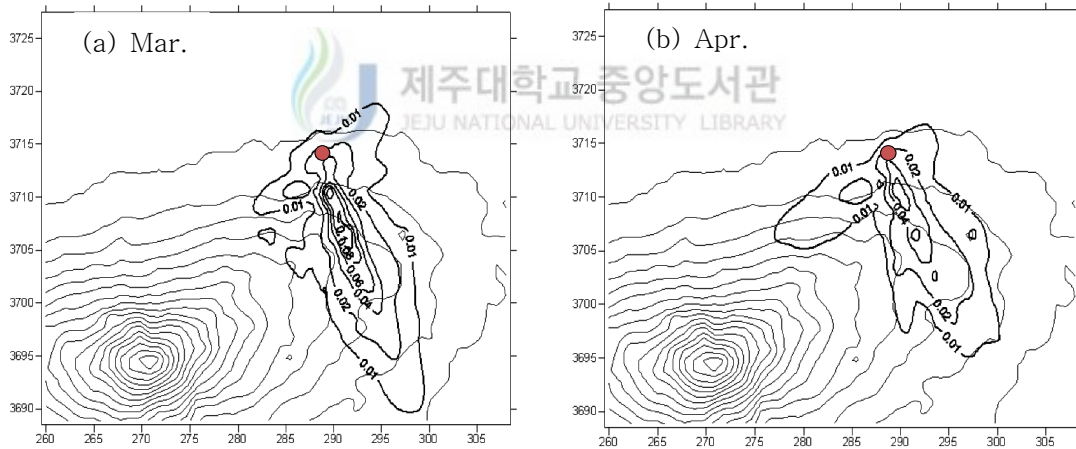


Fig. 22. The contour of PM₁₀ concentration modelled for March and April.

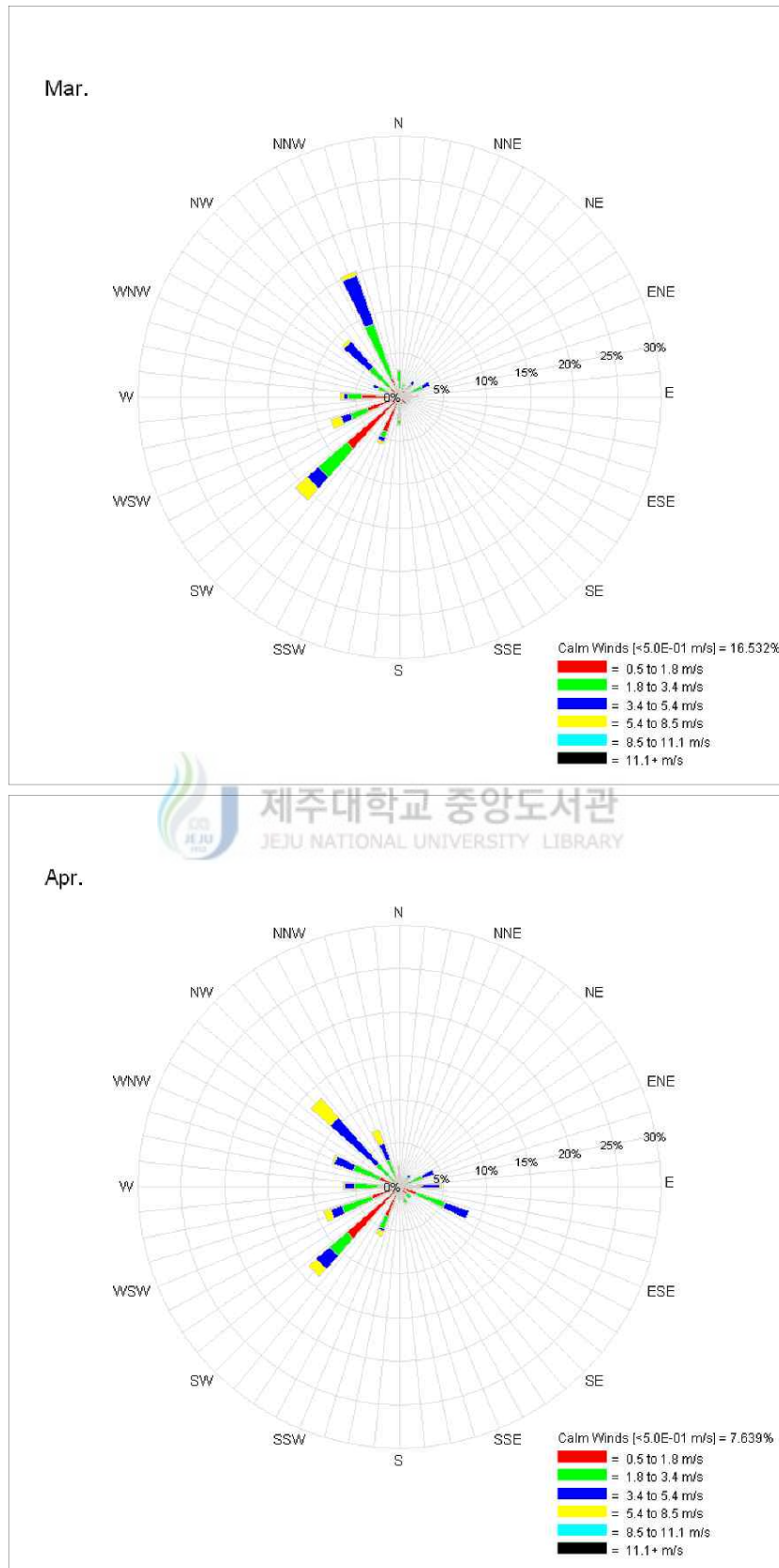


Fig. 23. wind rose predicted for Mar. and Apr. at the site of New MSW incinerator.

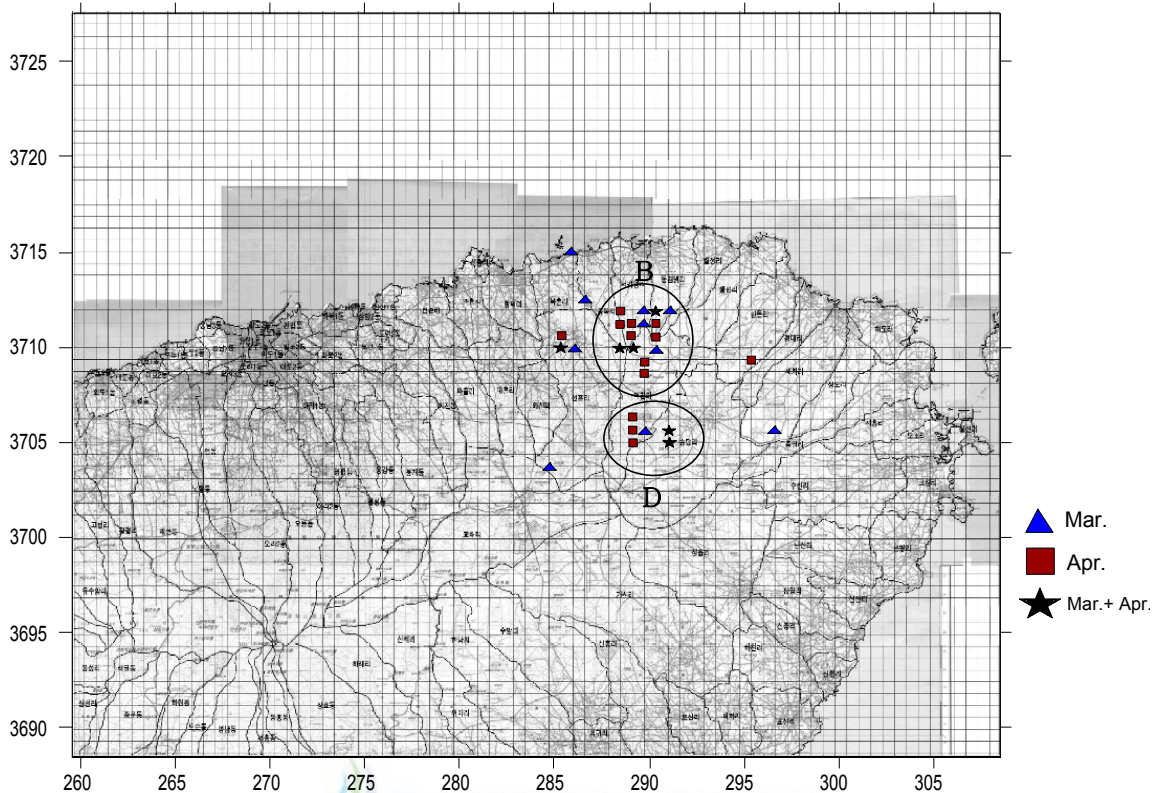


Fig. 24. The position of daily max. ground level concentration of NO_2 and PM_{10} modelled for March and April.

Fig. 25와 Fig. 26은 5월과 6월에 고층 및 지상기상자료에 근거하여 예측된 연기분산범위와 방향을 NO_2 와 PM_{10} 에 대해 나타낸 것이다. 5월의 연기분산형태를 보면 3월과 4월의 분산형태와 유사하게 폐기물소각시설 배출구를 중심으로 남동방향으로 넓고 길게 확산되어감과 동시에 남서북동 방향으로 확산되어가는 T형에 가까움을 보였다. 6월에는 폐기물소각시설 배출구에서 남동과 북동방향으로 넓게 퍼져나가지만, 남서방향으로도 길고 넓게 확산되어 나가는 형태를 보인다. 이 경우에는 제주시 도심권 전체와 제주도 동북부 일대에 넓게 영향을 줄 수 있는 형태인데 특히, 6월에는 제주시 시가지 전역에 폭넓게 영향을 줄 수 있음을 볼 수 있다.

Fig. 27에는 폐기물 소각시설이 건설되는 지점에서 5월과 6월에 예측된 바람장미를 나타냈다. 그림에서 보면 5월에는 W~SW계열과 동풍이 주로 부는 나타났는데 그림에서 보듯이 동풍계열의 바람을 W~SW계열 바람보다 풍속등급이 높은 바람의 빈도가 높은 것으로 나타났다. 즉 동풍의 풍속은 주로 2등과 3등급의 바람이었다. 6월에는 NE~E계열 바람의 빈도가 아주 높았고 SW 바람도 간혹 부는 것으로 예측되었다.

이러한 바람으로 인해 6월에 배출구에서 배출된 대기오염물질이 제주시 시가지 전역으로 분산되어 갈 것으로 생각된다.

Fig. 28은 5월과 6월에 일일 지상최고농도가 나타난 곳을 보인 것이다. 폐기물 소각 시설이 위치할 곳에서 좌·우 인근지역에 지상최고농도가 자주 출현할 것으로 예상되었고, 특히 6월에는 폐기물 소각시설건설 예정지점에서 제주시 시가지 방향인 SW 방향으로 지상최고농도가 나타나는 지점이 이어져 나타나는 것을 알 수 있다.

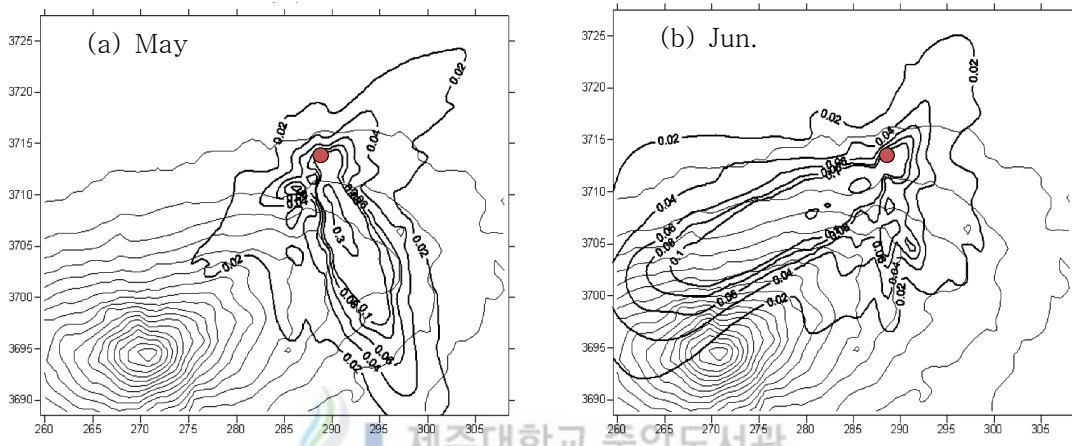


Fig. 25. The contour of NO_2 concentration modelled for May and June.

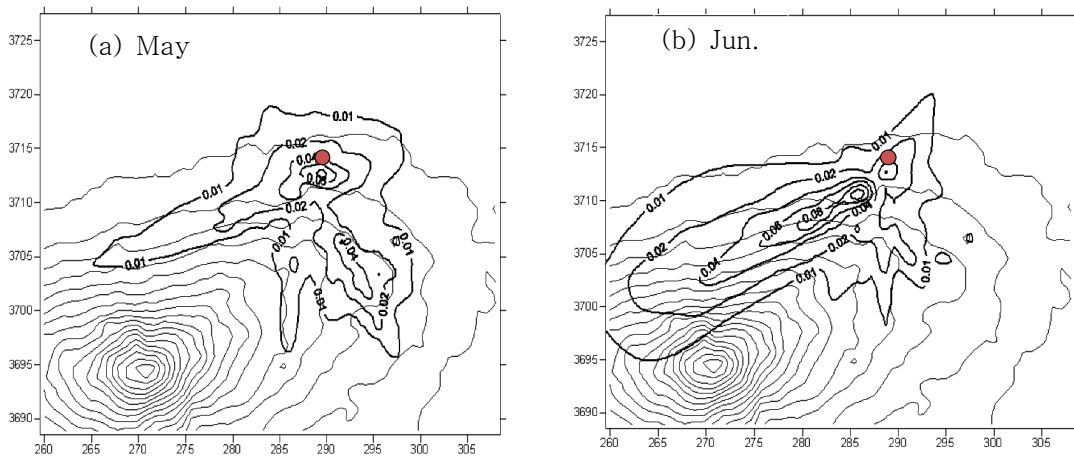


Fig. 26. The contour of PM_{10} concentration modelled for May and June.

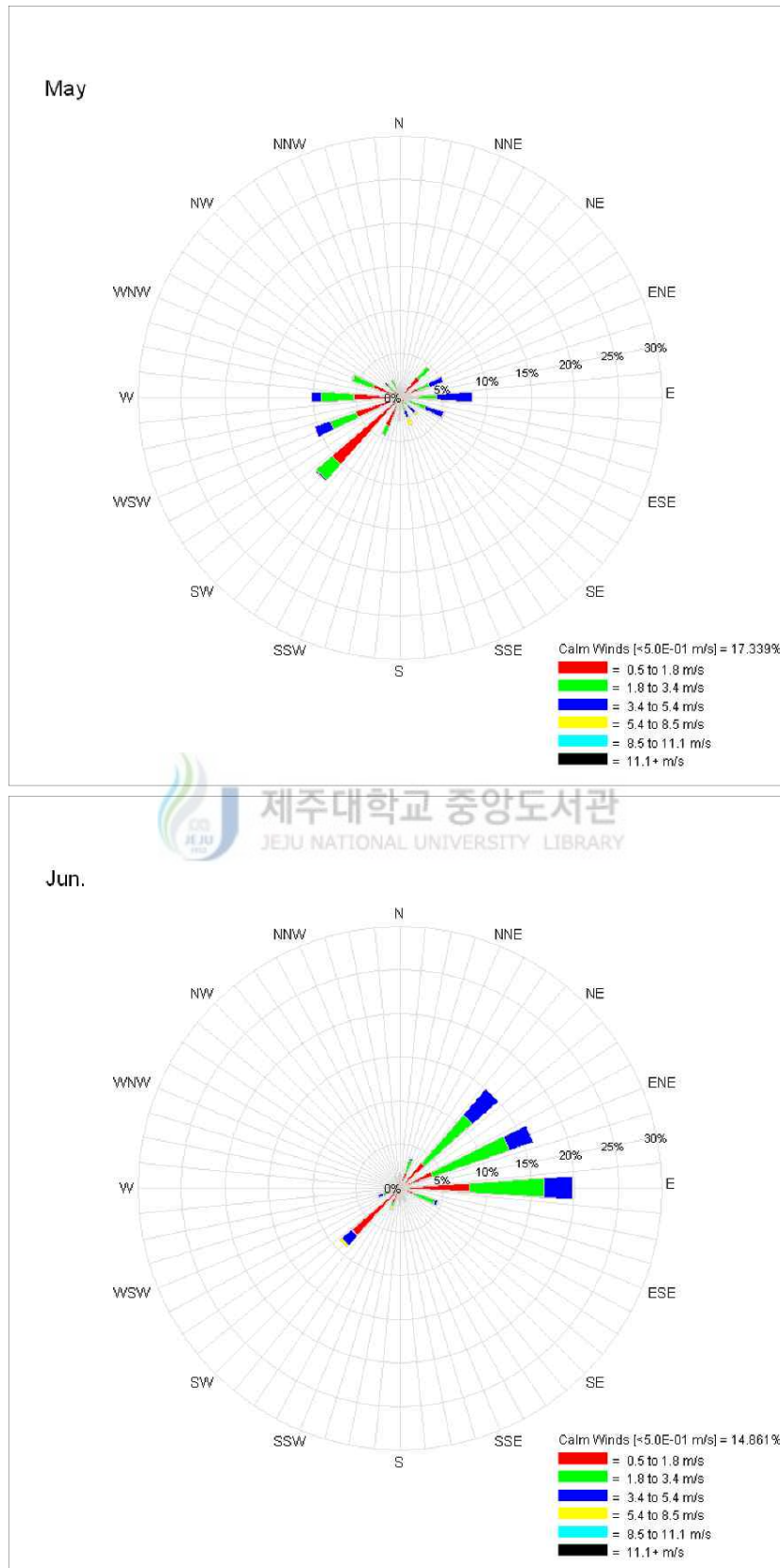


Fig. 27. wind rose predicted for May. and Jun. at the site of New MSW incinerator.

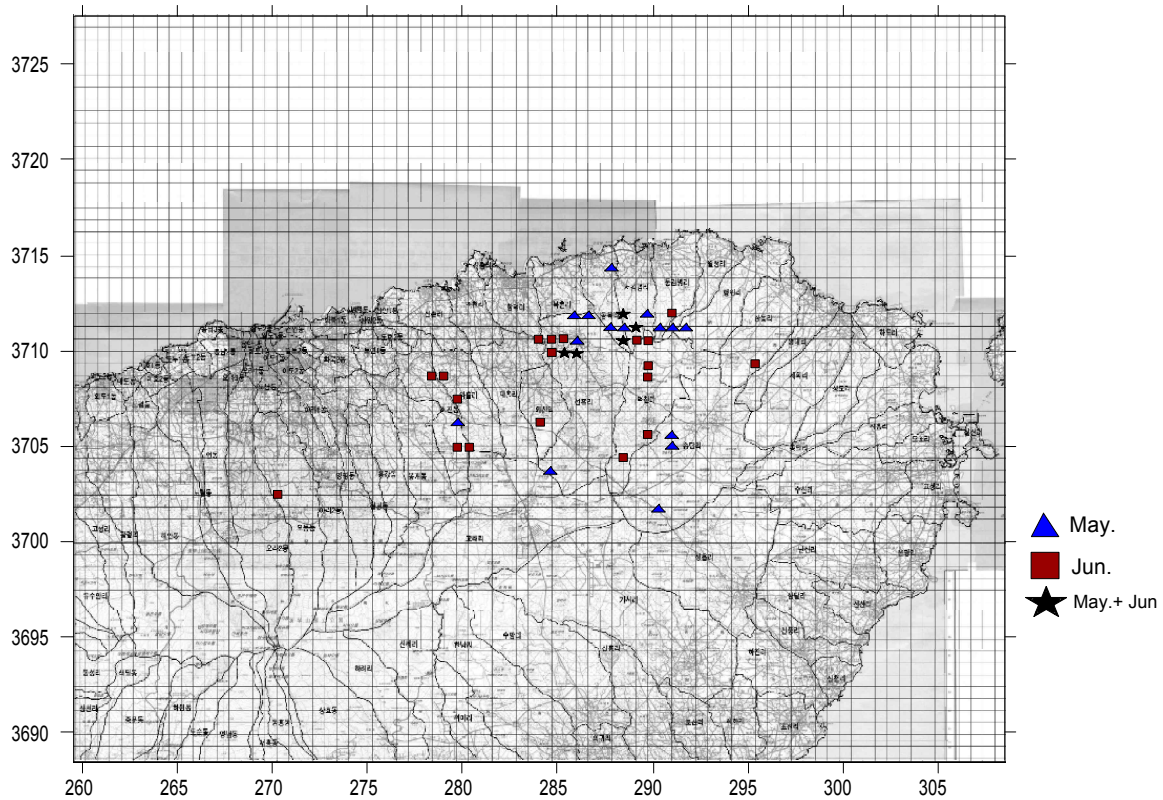


Fig. 28. The position of daily max. ground level concentration of NO₂ and PM₁₀ modelled for May and June.

Fig. 29와 Fig. 30은 7월과 8월의 기상자료에 의해 예측된 연기확산 범위와 방향을 나타냈다. 폐기물소각시설의 배출구에서 북쪽과 북동방향의 바다를 향하여 확산되어 나가는 형태를 보임을 알 수 있다. 이는 NO₂와 PM₁₀이 거의 비슷한 분산형태를 나타냈다.

Fig. 31은 폐기물 소각시설이 건설될 예정지에서 7월과 8월에는 각각 SW~S과 WSW~S의 바람이 집중적으로 부는 것으로 예측되었다. 특히 7월에 분 SW~S 바람의 풍속등급으로 보면, 3등급과 4등급의 바람이 많이 분 것으로 나타남을 볼 수 있다. 따라서 Fig. 29와 Fig. 30에서 보는 바와 같이 북동쪽으로 연기가 분산되어 나가는 것으로 예측된다. 그러므로 이와 같은 분산형태가 나타나는 경우에는 폐기물 소각시설에서 배출된 연기가 인근지역에 미치는 영향범위가 가장 최소가 될 것으로 예상된다.

Fig. 32은 7월과 8월에 일일 지상최고농도가 나타난 곳을 보인 것이다. 7월 8월에는 폐기물 소각시설이 위치할 곳 인근 B지역에 지상최고농도가 자주 출현할 것으로 예상된다.

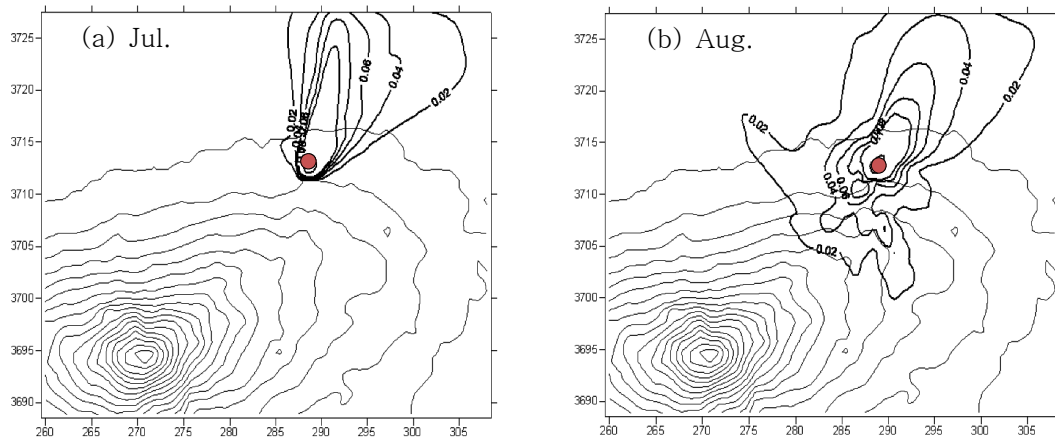


Fig. 29. The contour of NO₂ concentration modelled for July and August.

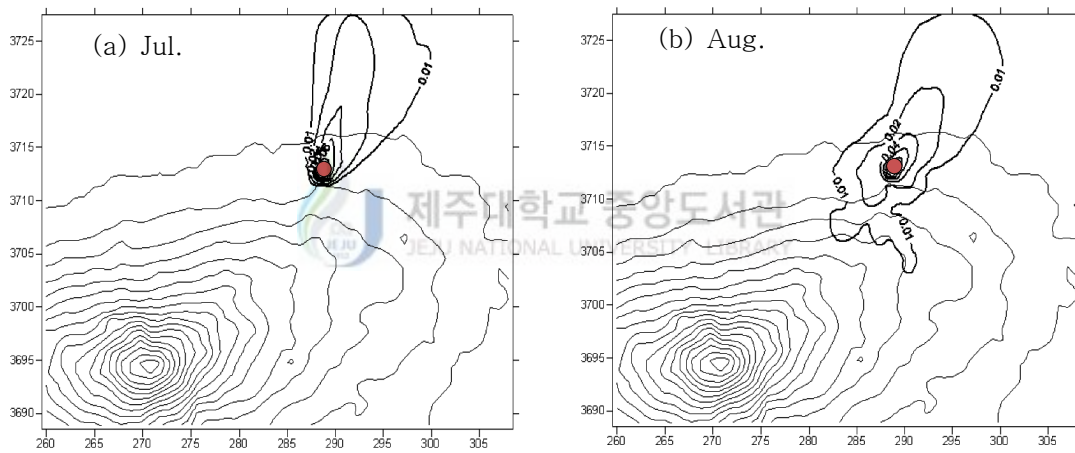


Fig. 30. The contour of PM₁₀ concentration modelled for July and August.

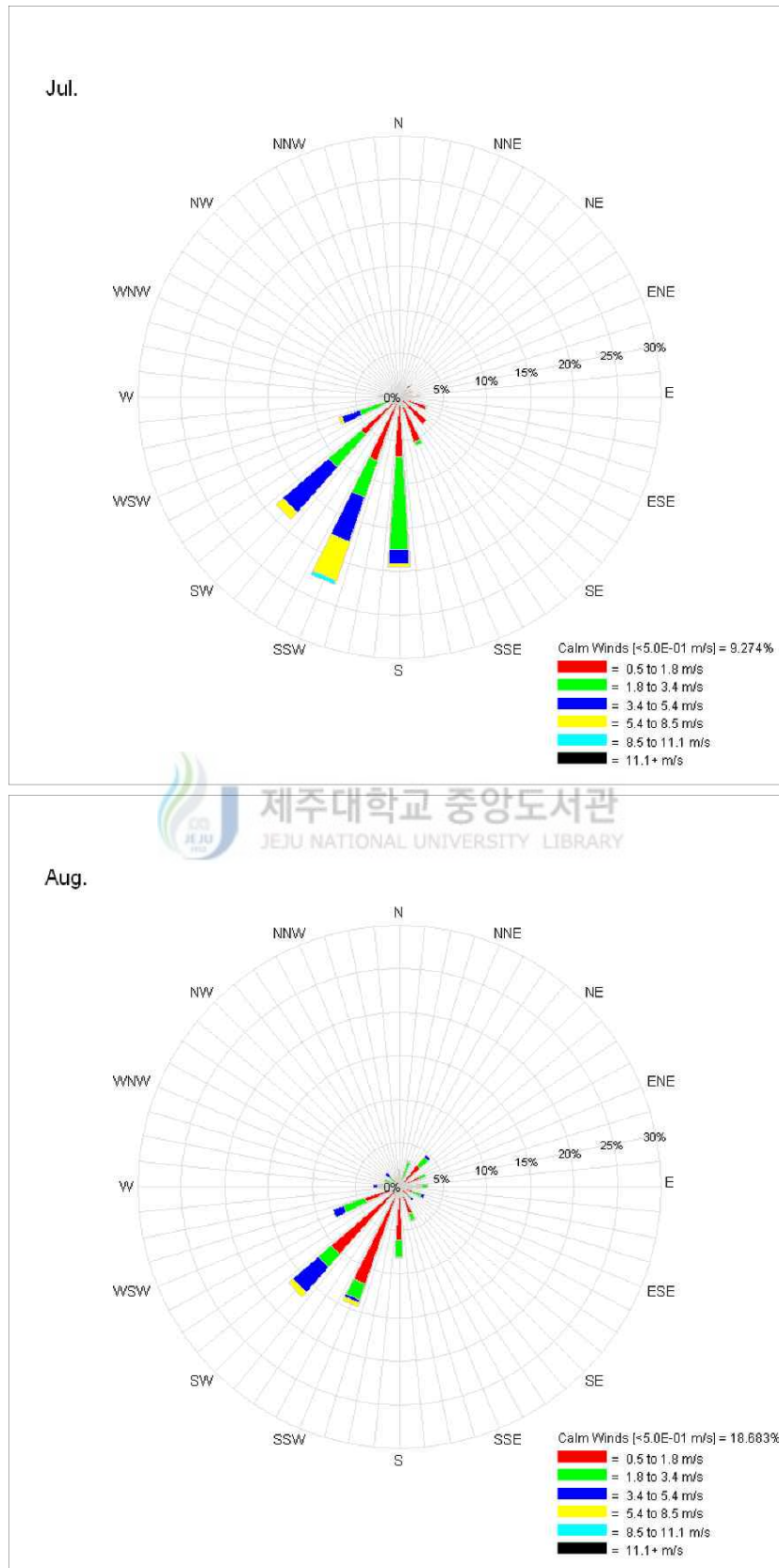


Fig. 31. wind rose predicted for Jul. and Aug. at the site of New MSW incinerator.

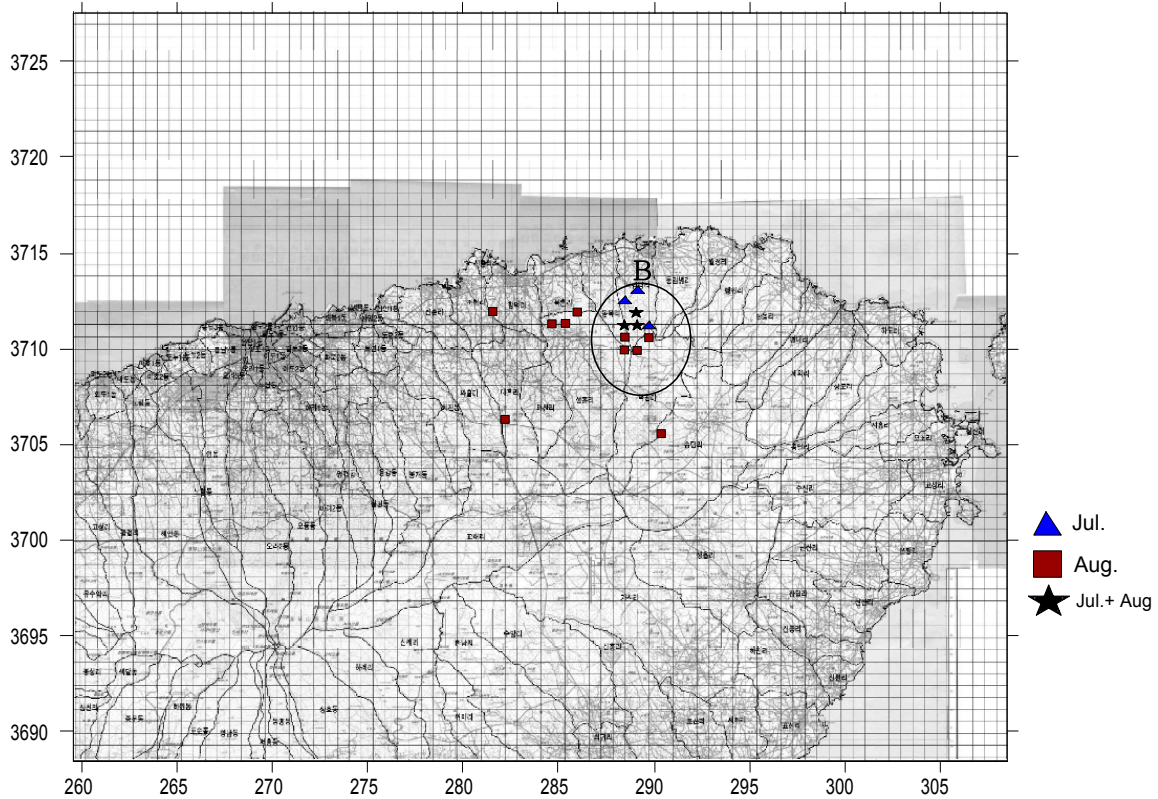


Fig. 32. The position of daily max. ground level concentration of NO_2 and PM_{10} modelled for July and August.

Fig. 33와 Fig. 34은 9월과 10월에 대해 예측된 연기 분산 범위를 나타냈다. 폐기물 소각시설의 배출구로부터 남서쪽 방향으로 제주시 시가지와 한라산 정상 방면 및 한라산 동쪽 사면 그리고 제주도 동부지역에 걸쳐 아주 넓은 범위로 확산되어 나가는 형태를 보임을 알 수 있다. 신규로 건설될 폐기물소각시설이 가동되면 제주시 시가지 지역 전역 및 제주도 동부지역 전체를 영향권으로 할 수 있는 형태라고 판단된다.

Fig. 35에는 폐기물 소각시설이 건설되는 지점에서 9월과 10월에 예측된 바람장미를 나타냈다. 9월에는 NNE~E 바람의 빈도가 높게 나타났으며 나머지 풍향의 바람은 빈도가 낮았다. 10월에는 NE~E계열 바람의 빈도가 높게 나타났고 NW와 NNW와 SW의 바람의 빈도도 꽤 높게 나타나는 것으로 예측되었다. 이러한 바람으로 인해 폐기물 소각시설에서 배출되는 연기분산범위는 제주시 시가지지역과 제주도의 북동부지역 전체범위로 분산되어 갈 것으로 예상된다.

Fig. 36는 9월과 10월에 일일 지상최고농도가 예상되는 곳을 나타낸 것이다. 9월과

10월에는 폐기물 소각시설이 위치한 곳에서 제주도 북동부지역 전체적으로 지상최고 농도가 자주 출현하는 것으로 예상된다. 그리고 지상최고농도가 나타나는 지점이 제주시 시가지 방향으로 이어져 나타남을 볼 수 있는데, 이는 6월의 경우와 유사한 경향을 보였다.

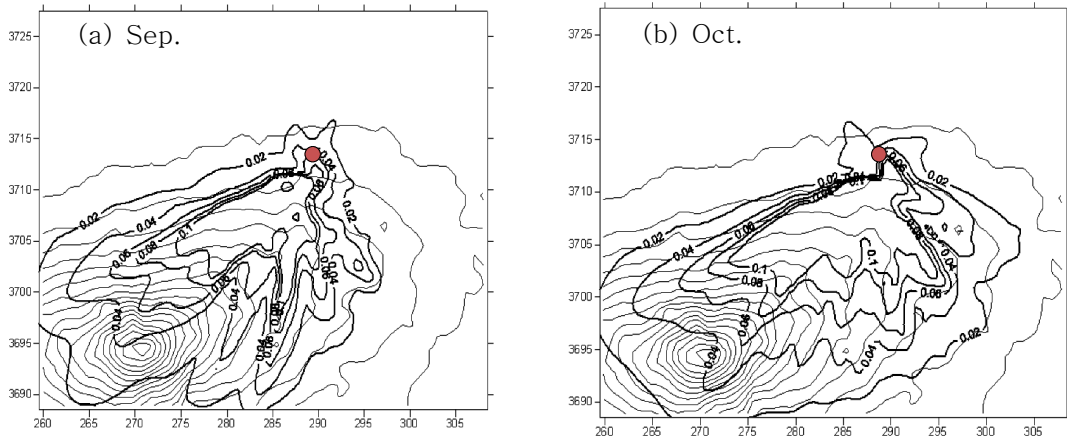


Fig. 33. The contour of NO_2 concentration modelled for September and October.

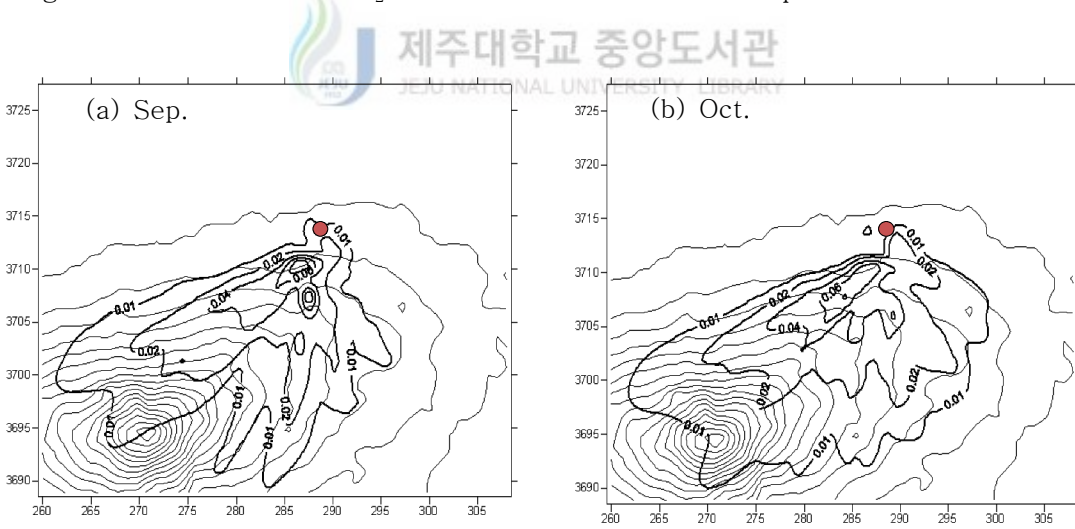


Fig. 34. The contour of PM_{10} concentration modelled for September and October.

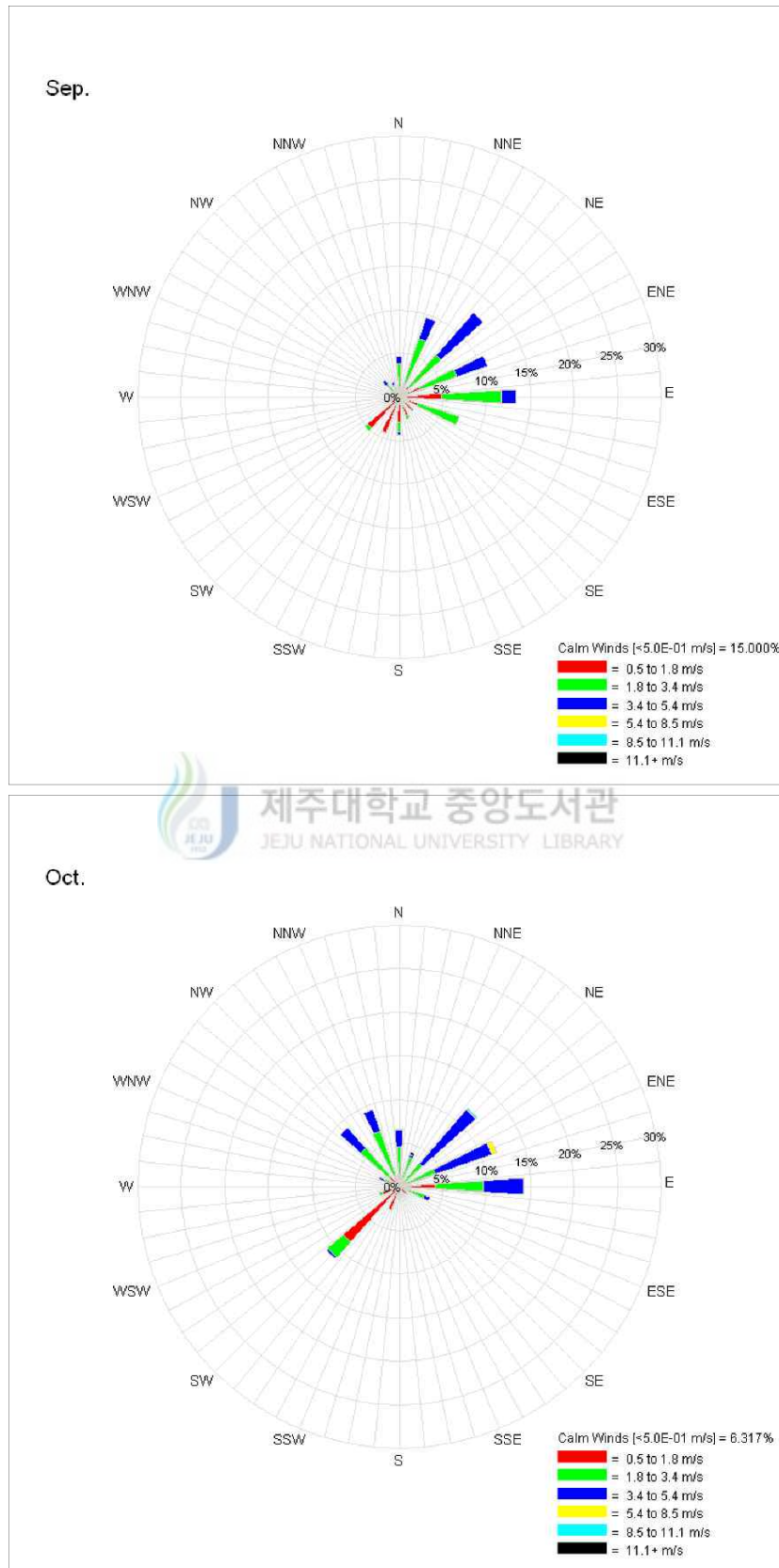


Fig. 35. wind rose predicted for Sep. and Oct. at the site of New MSW incinerator.

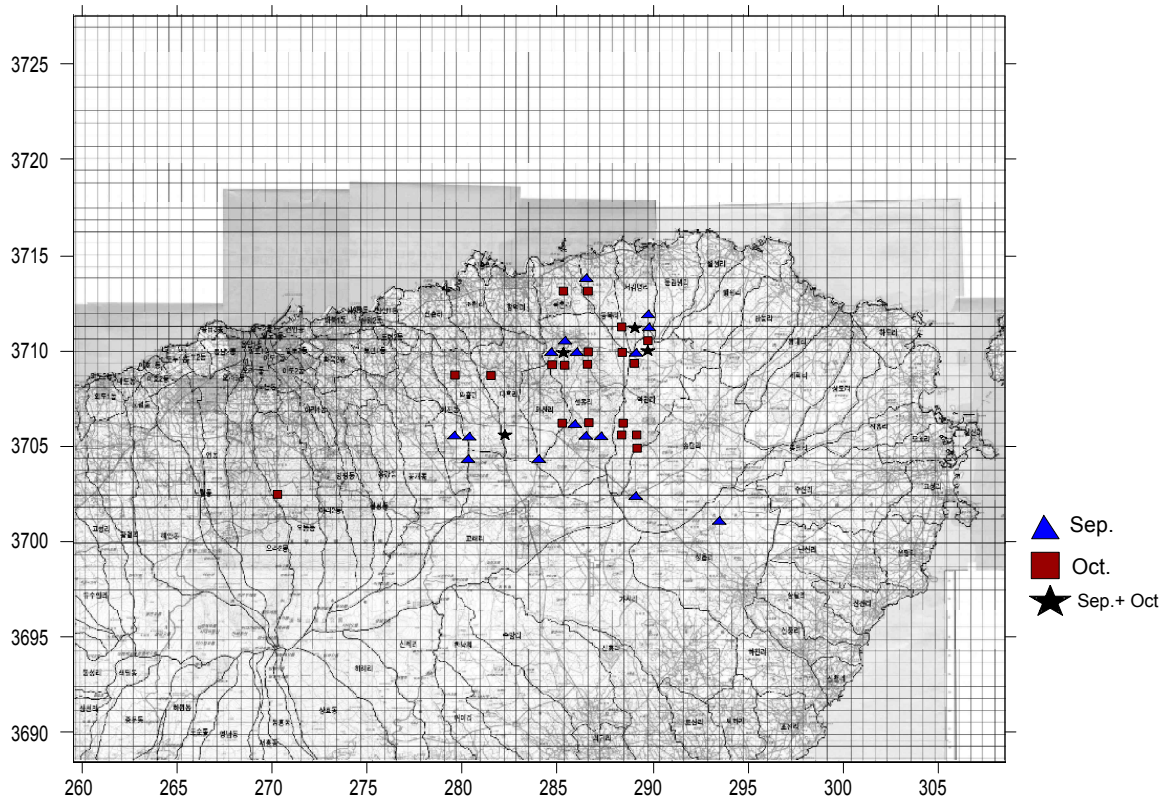


Fig. 36. The position of daily max. ground level concentration of NO₂ and PM₁₀ modelled for September and October.

Fig. 37과 Fig. 38은 11월과 12월에 예측된 연기 분산 범위를 나타냈다. 10월에는 제주시 시가지역을 덮었던 확산범위가 11월로 들면서 동쪽으로 밀려나가면서 제주시 시가지역으로의 확산은 거의 사라지고 제주도 동부지역으로 확산되어가는 형태를 보였다. 그림에서 NO₂와 PM₁₀의 분산형태가 아주 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 39은 폐기물 소각시설이 건설될 위치에서 11월과 12월에 예측된 바람장미를 보인 그림이다. 그림에서 보듯이 11월에 가장 빈도가 높았던 바람은 W~NW인 것으로 나타났다. 12월에는 WNW와 NW의 바람빈도가 높게 나타났으며, NNW과 SW를 포함하며 서풍계열의 바람의 빈도가 전반적으로 높음을 알 수 있다.

Fig. 40은 11월과 12월에 대해서 일일 최고지상농도가 나타날 것으로 예상된 곳을 나타냈다. 11월과 12월에는 주로 폐기물 소각시설의 건설예정지 주변으로 제주도 북동부지역에 비교적 산발적으로 최고농도가 나타날 것으로 예상되었다.

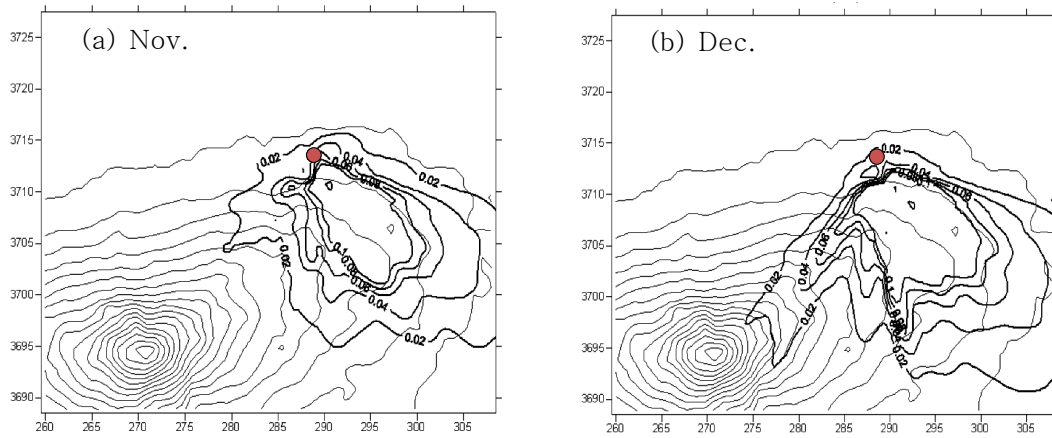


Fig. 37. The contour of NO_2 concentration modeled for November and December.

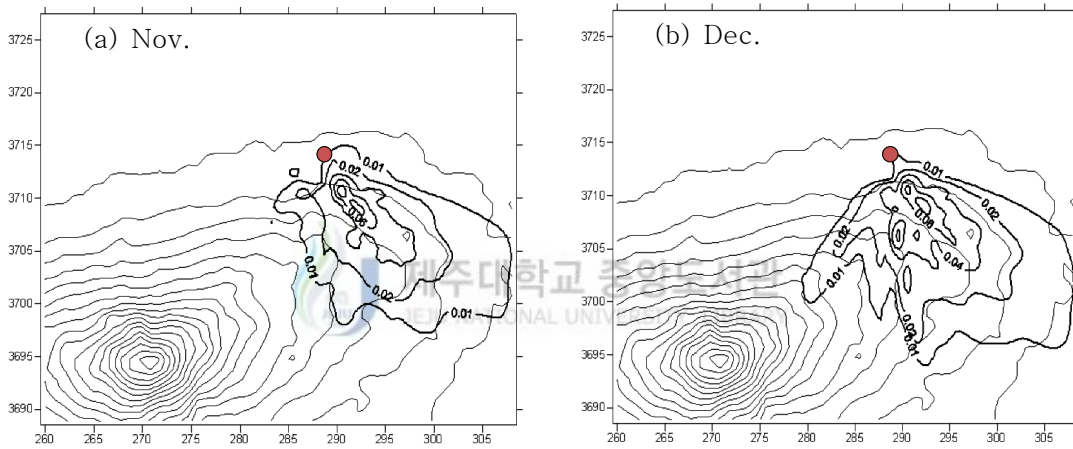


Fig. 38. The contour of PM_{10} concentration modelled for November and December.

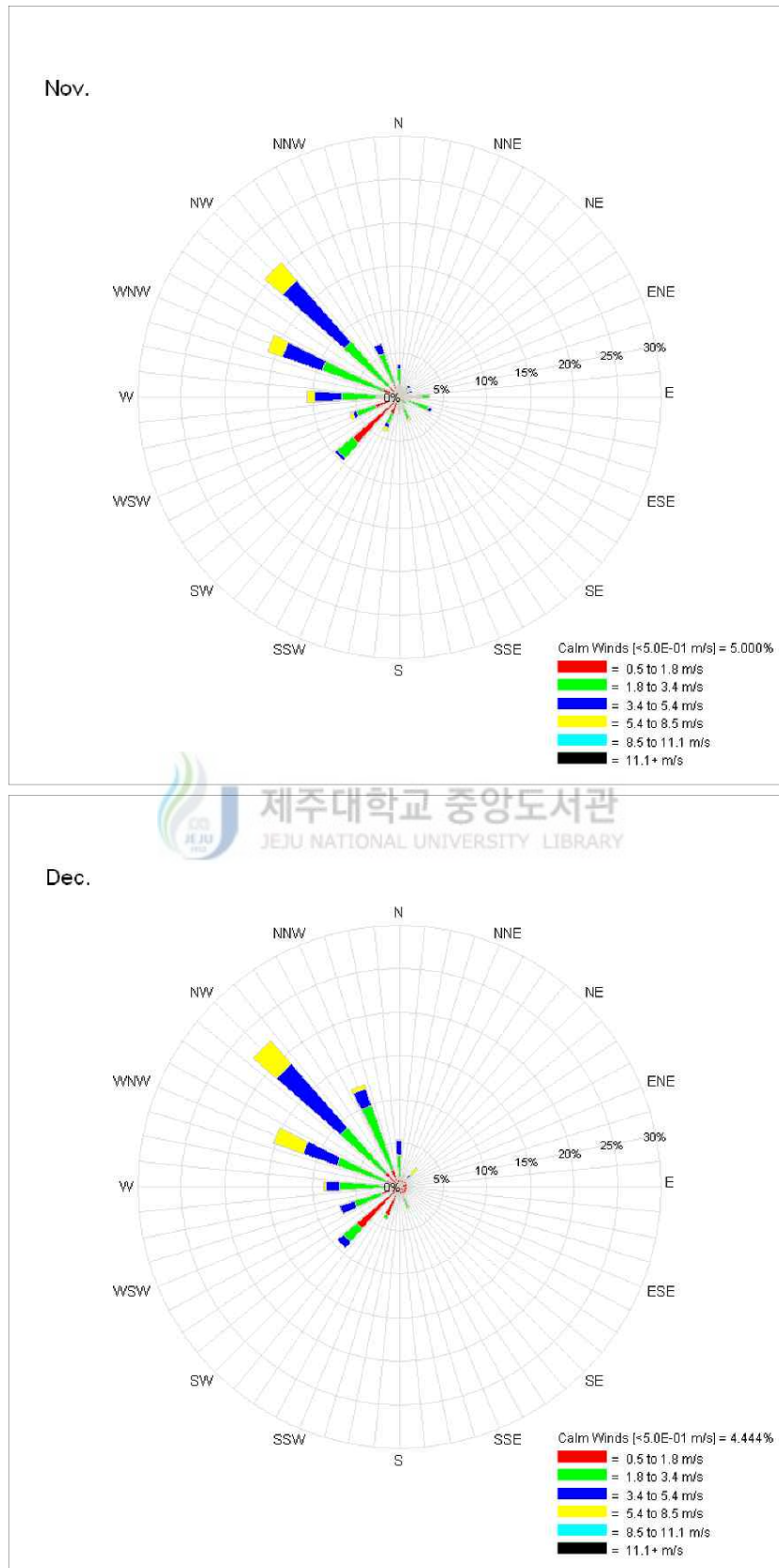


Fig. 39. wind rose predicted for Nov. and Dec. at the site of New MSW incinerator.

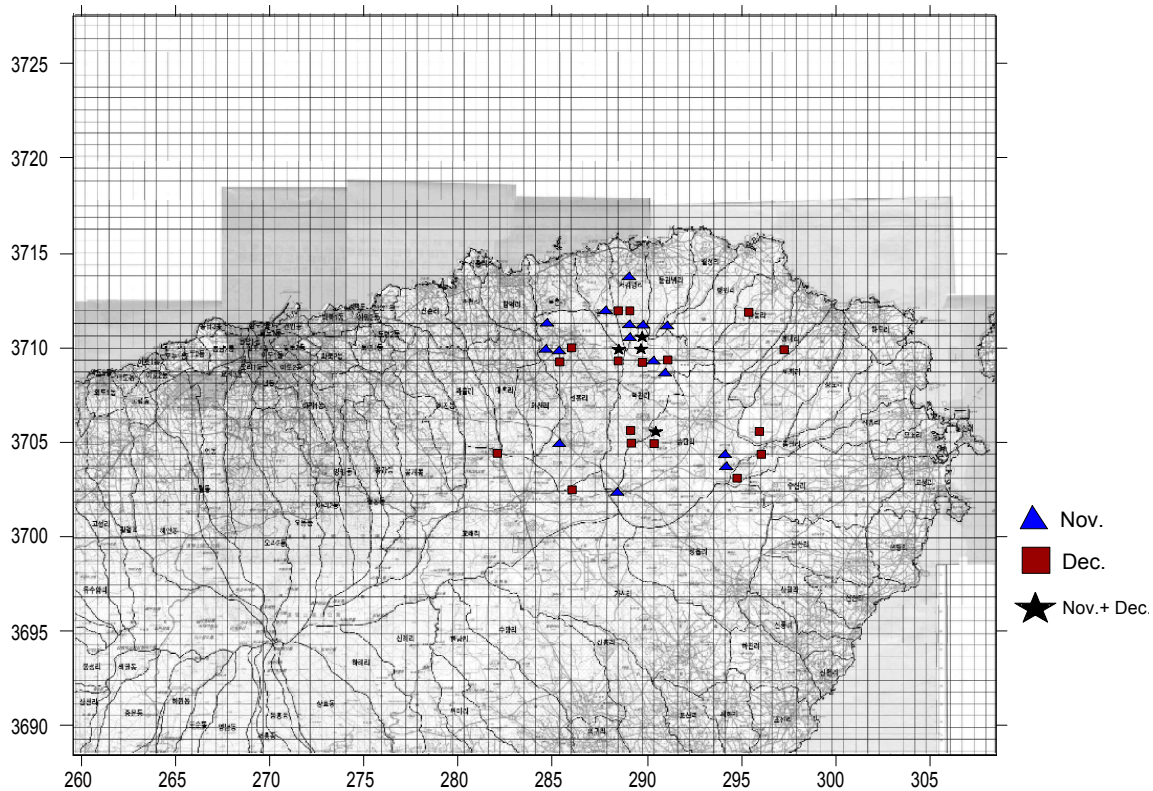


Fig. 40. The position of daily max. ground level concentration of NO_2 and PM_{10} modelled for November and December.

나. 대기오염물질의 분산형태 분류

제주도에 신규 폐기물소각시설이 건설예정인 곳에서 배출될 대기오염물질을 배출한다고 가정하여 CALPUFF모델에서 수행한 농도장을 바탕으로 신규 폐기물소각시설에서 배출될 대기오염물질의 분산방향과 지역을 보면서 대기오염물질의 분산형태를 4가지로 구분할 수 있었다.

A형 : 폐기물소각시설의 배출구에서 배출된 대기오염확산범위가 제주도 남동부 지역을 광범위하게 확산되어 나가는 형태로써, 주로 동절기인 1월과 2월 그리고 11월과 12월에 이러한 분산형태를 보였다. 특히 1월과 2월에는 주로 배출구를 중심으로 남쪽 방향으로 길고 넓게 퍼져나가고, 11월과 12월에는 배출구로부터 동남쪽으로 확산되어 나가되 1월과 2월에 비해 보다 동쪽으로 치우쳐서 넓게 확산되어 가는 형태를 보였다.

B형: 봄철인 3월과 4월 그리고 5월에는 폐기물소각시설의 배출구에서 동남쪽 방향으로 넓게 그리고 길게 확산되어 나가고 있고 이와 동시에 배출구를 중심으로 북동 및 남서 방향으로도 퍼져나가는 T자형태의 모양을 갖추는 분산형태를 나타내고 있다.

C형: 7월과 8월에는 폐기물소각시설의 배출구에서 북쪽과 북동방향의 바다를 향하여 길게 뻗어나가는 형태로 확산되어 나가는 형태를 보이고 있다. 이 경우 인근 지역의 영향 범위는 최소가 되는 분산형태라고 판단된다.

D형: 신규 건설될 폐기물소각시설의 배출구로부터 남서쪽 방향으로 제주시 시가지와 한라산 정상 방면 및 한라산 동쪽 사면 그리고 제주도 동부지역에 걸쳐 아주 넓게 확산되어 나가는 형태로서 9월과 10월에 나타났다. 6월의 분산형태를 보면 9월과 10월처럼 지역적으로 아주 넓지는 않지만 남서방향으로 확산되어 나가는 형태를 나타내고 있다. D형은 신규 폐기물소각시설 배출구의 연기확산범위가 제주시 시가지역전역 및 제주도 동부지역 전체를 영향권으로 할 수 있는 형태라고 판단된다.

대기오염물질의 분산형태를 보면 동절기(11월과 12월 그리고 1월과 2월)와 가을철(9월과 10월)에 제주지역에 가장 넓은 영향 범위를 보일 수 있는 조건이 나타나기 쉽다는 것을 소각시설을 가동할 시에 염두에 둘 필요가 있다.

이처럼 신규로 건설될 예정인 폐기물 소각시설과 그 주변지역을 대상으로 CALPUFF 모델로 모델링을 수행하며 소각로에서 배출된 대기오염물질이 주변지역에 미치는 영향을 파악할 수 있었는데 CALPUFF 모델로 예상한 분산형태를 보면 전면적으로 바람장의 영향이 지배적인 것으로 나타났다. CALPUFF 모델은 시간에 따른 풍향의 변화를 잘 반영한 확산분포를 보이며, 풍속의 정도에 따라 확산정도가 달라지는 경향을 보인다고 알려져 있다(Kim, 2011; Son, 2005). 그렇지만 본 연구의 확산범위와 농도수준에 관한 결과는 강우에 의한 습성침적의 영향은 제대로 반영하지 않았다는 한계도 있음을 기억해야 할 것이다.

다. 배출량 저감에 따른 확산형태

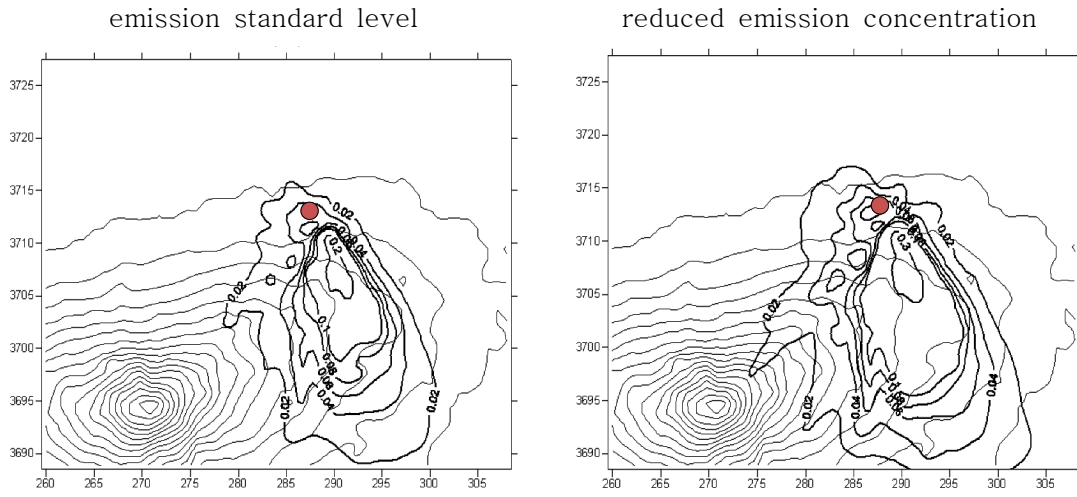
신규 폐기물 소각시설은 현재의 배출허용기준 수준의 대기오염물질을 배출하기 보다는 최소한 현재 우리나라에서 가동되고 있는 비슷한 규모의 폐기물 소각시설의 배출수준은 유지할 수 있다. 따라서 Table 7에 제시된 현재 가동중인 폐기물 소각시설 중 수원폐기물 소각시설의 NO₂와 PM₁₀의 배출량 정도로 저감된 수준으로 폐기물 소각시설이 가동된 경우에 예상되는 대기오염물질의 확산범위와 방향을 앞서 배출허용기준 수준으로 운영할 경우와 비교하였다. 여기서는 앞에서 이미 살펴본 바와 같이 배출허용기준으로 운영할 경우 착지농도가 높은 것으로 나타난 2월과 5월 그리고 10월을 선정하여 비교하였다.

Fig. 41과 Fig. 42는 2월의 NO₂와 PM₁₀을 배출허용기준에 맞춰 배출하는 경우와 배출허용기준의 60% 수준인 배출농도로 저감하여 운영하는 경우에 대해 연기 분산범위를 비교하여 보인 것이다. 폐기물 소각시설의 배출구에서 저감된 농도로 배출되는 경우에 대한 NO₂의 확산범위를 보게 되면 배출허용기준으로 배출되는 경우와 확산형태는 대단히 유사하지만 동일농도를 보이는 범위는 축소됨을 알 수 있다.

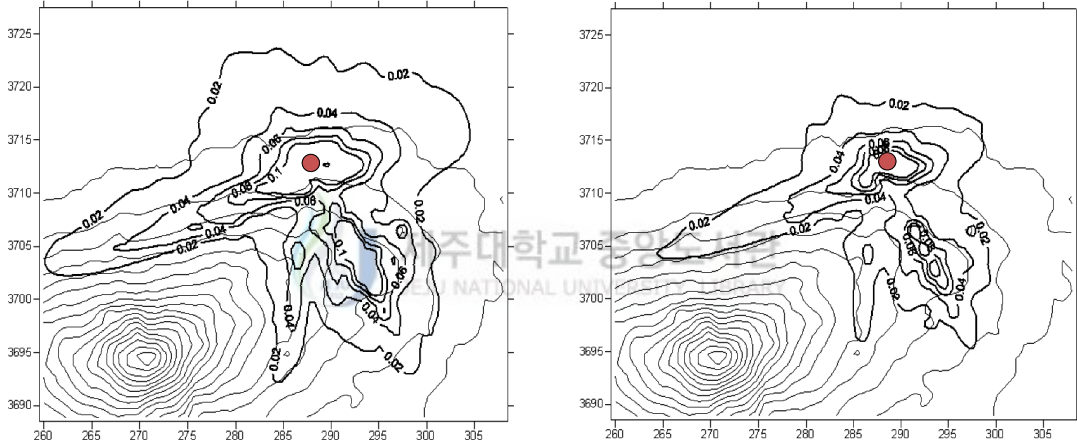
PM₁₀의 경우에는 배출허용기준의 18% 저감된 농도수준으로 배출함에 따라 그 확산범위는 대폭 축소되는 것으로 나타남을 볼 수 있다.

이러한 결과로 볼 때 새로이 건설될 대형 폐기물 소각시설은 현재의 기술수준으로 설계되어 가동될 경우에 배출구를 통해 배출되는 대기오염물질의 분산범위와 농도수준을 고려하면 인근지역에의 영향은 미미할 것으로 예상된다.

(a) Feb.



(b) May



(c) Oct.

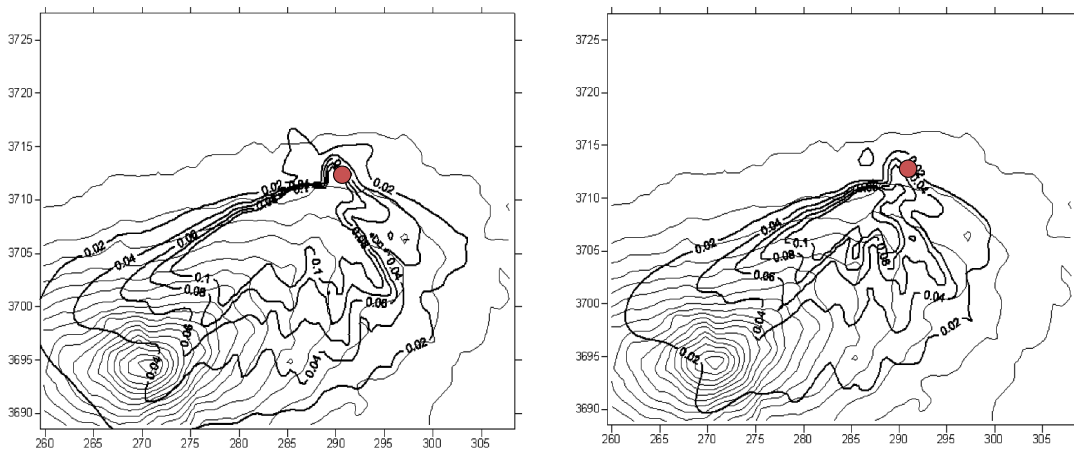
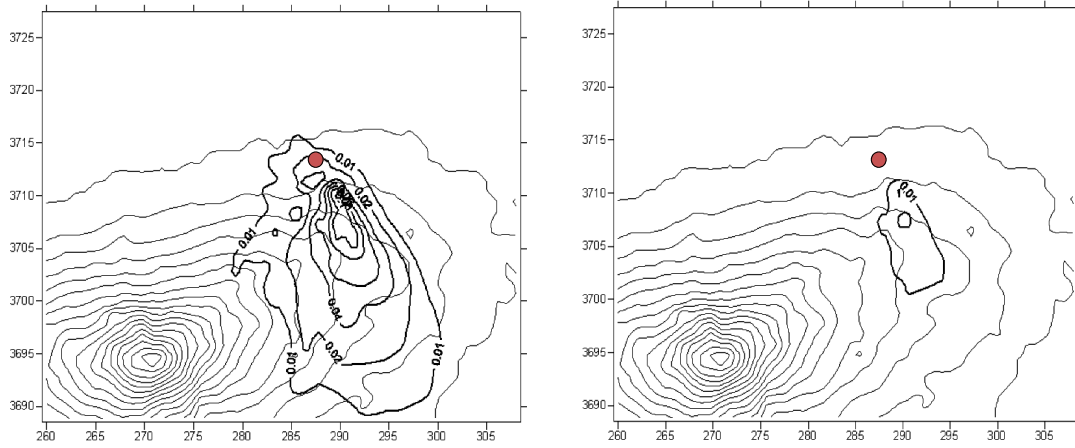
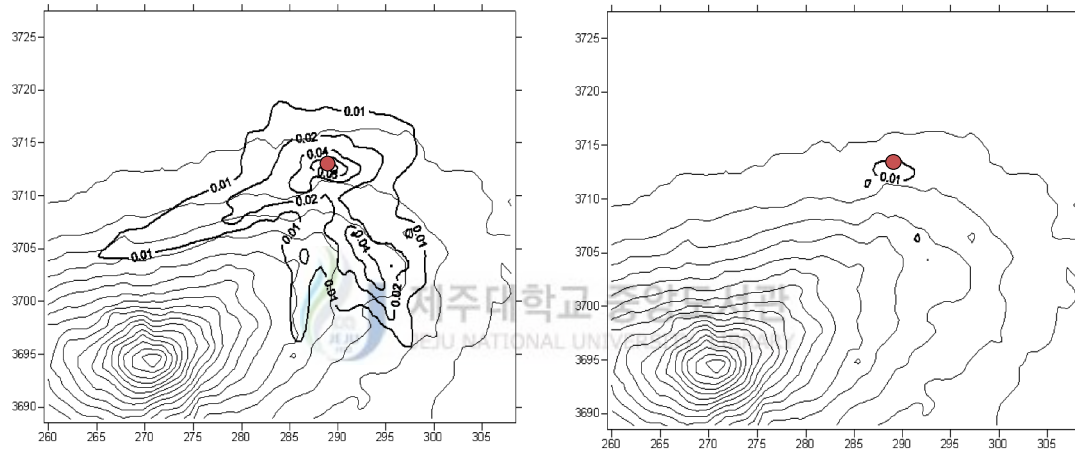


Fig. 41. The comparative analyses of area of influence of flue gas from MSW faicity which is operating at the emission cocentration of NO₂ with the present Korea emission standard and the reduced level less than the present standard.

(a) Feb.



(b) May



(c) Oct.

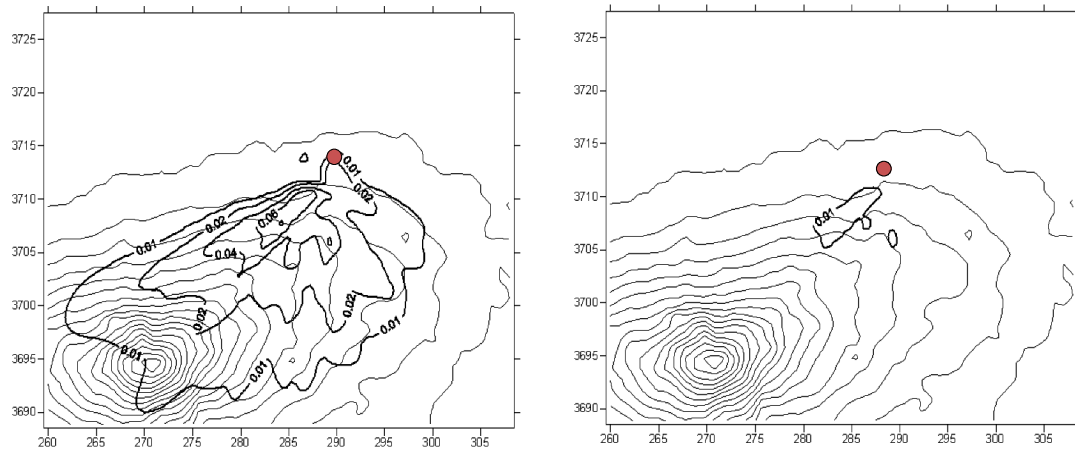


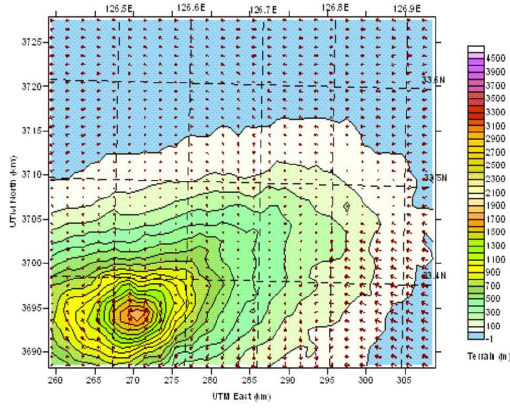
Fig. 42. The comparative analyses of area of influence of flue gas from MSW facility which is operating at the emission concentration of PM_{10} with the present Korea emission standard and the reduced level less than the present standard.

라. 사례일 분석

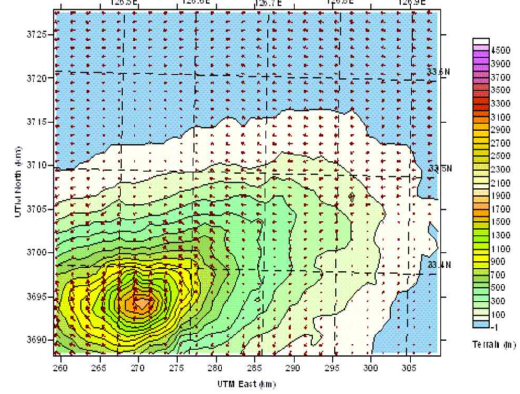
제주도 의 북동부 지역에 대해서 지상최고 착지농도를 나타낸 2월 6일에 대한 사례일을 선정하여 2013년 2월 5일부터 2월 7일까지 시간별 바람장을 모사하였으며, 그 중 2013년 2월 5일부터 7일까지 매 09시와 15시의 모사결과를 Fig. 43에 나타냈다. 그림에서 보면 2월 5일에는 바람의 세기가 상대적으로 약한 동풍이 형성되고 있으나 6일이 되면서 점차 바람이 강해지면서 풍향도 북서풍으로 바뀌었음을 볼 수 있다. 그리고 7일에 들면서 6일보다 바람이 좀더 강해지면서 한라산 동쪽 사면에서의 바람이 북북서풍으로 바뀌어 감을 볼 수 있다.

Fig. 44는 사례일의 확산현상을 파악하기 위해서 일별로 24시간 평균농도 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 43에서 사례일의 바람을 분석 결과와 같이 시간이 지남에 따라 동풍에서 북서풍 그리고 북북서풍으로 변화를 반영한 확산분포를 보임을 알 수 있다. 제주시 시가지역을 중심으로 볼 때 약한 동풍이 부는 5일의 경우와 비교적 강한 북서풍이 부는 6일의 경우 풍향의 변화에 따라서 확산범위와 확산방향이 달라지는 경향을 볼 수 있다. 이러한 모델 결과를 나타내는 것은 CALPUFF 모델이 복잡한 지형과 공간적 해상도를 갖는 3차원 기상모델결과를 puff 이동에 활용하는 비정상상태 모델이므로 시간변화에 따른 바람의 변화를 확산에 잘 반영하기 때문이다(Kim, 2011).

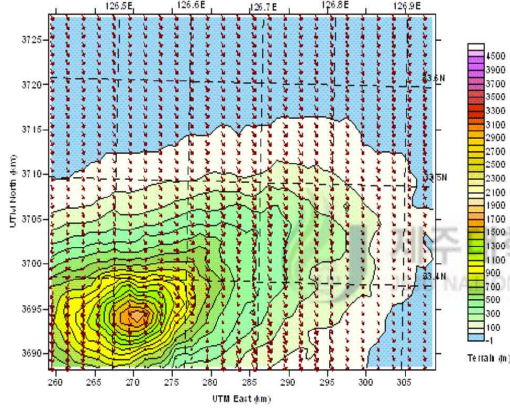
(a) Feb. 05, 09:00



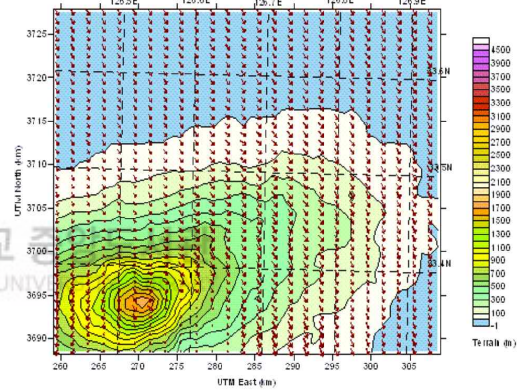
(b) Feb. 05, 15:00



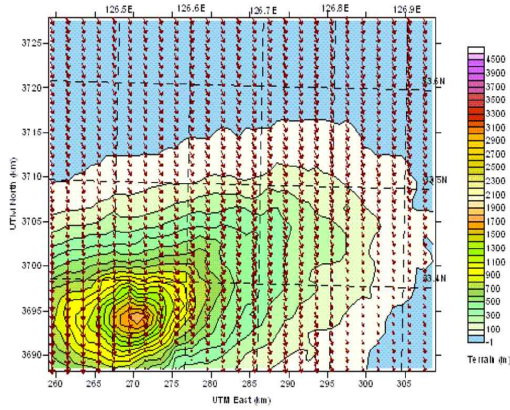
(c) Feb. 06, 09:00



(d) Feb. 06, 15:00



(e) Feb. 07, 09:00



(f) Feb. 07, 15:00

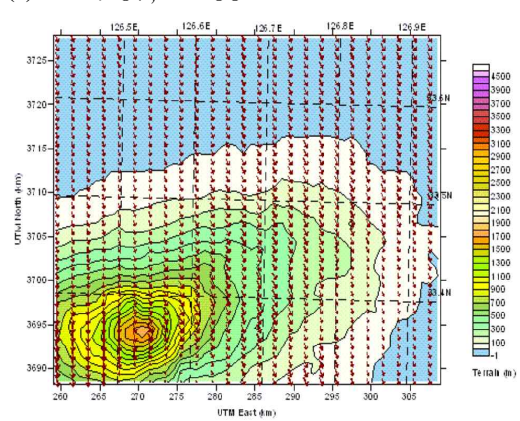


Fig. 43. The wind field of CALMET

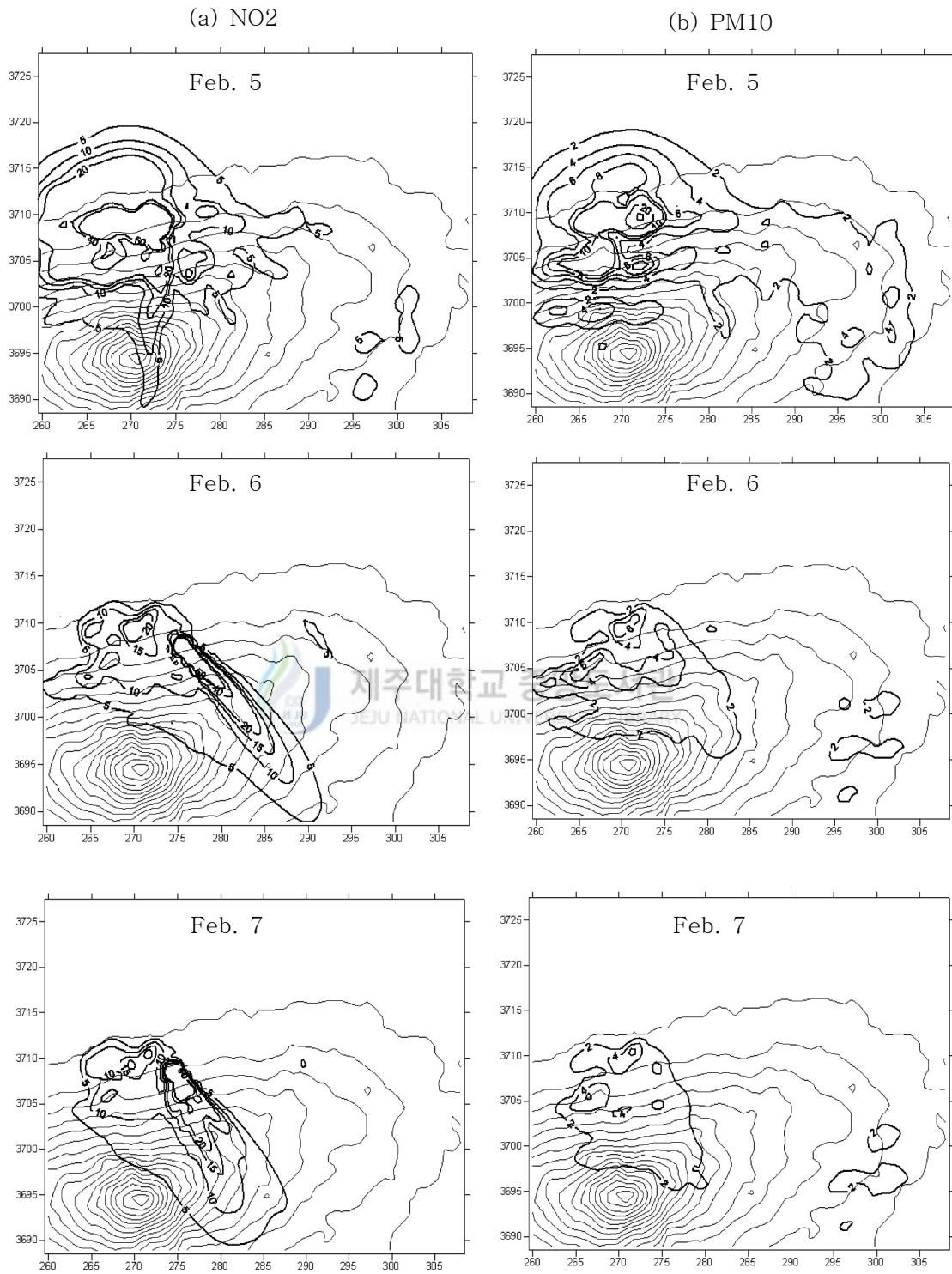


Fig. 44. The simulated distributions of NO₂ and PM₁₀ concentrations by CALPUFF model.

5. 결론

본 연구에서는 제주시 지역에 새롭게 건설될 계획인 500 ton/day 규모의 도시폐기물 소각시설의 가동에 따른 대기오염 영향범위를 CALPUFF 대기확산모델을 이용하여 예측하였다.

1. 폐기물 소각시설을 현재의 배출허용기준에 맞게 대기오염물질을 배출한다는 NO₂의 월평균 가중농도는 최고 0.665ppb 수준이며 PM₁₀은 0.19 μ g/m³ 수준으로 아주 낮아서 주변지역에 미치는 영향은 미미할 것으로 나타났다. 신규폐기물 소각로가 현재 전국적으로 가동되고 있는 대형 폐기물 소각로의 배출농도수준정도로만 운전된다면 주변지역에 미치는 영향은 극히 미미할 것으로 예측되었다.

2. 본 연구대상지역에 위치할 신규 폐기물 소각로를 중심으로 배출가스 분산형태를 4가지로, 즉 동절기형(1~2월과 11~12월), 봄철형(3월~5월), 하절기형(7~8월) 그리고 가을철형(9~10월과 6월)으로 구분할 수 있었다. 이러한 구분이 가능한 것은 CALPUFF모델이 시간에 따른 바람의 변화를 확산에 잘 반영하는 특징에 기인한 때문이다.

3. 본 연구에서는 강우에 의한 습성침적을 전혀 고려하지 않았으므로, 모델결과의 해석에 한계가 있다. 그런 면오염원과 선오염원에 대한 배출량 자료는 계절별 변화를 고려하지 않았다.

참고문헌

Yoon. H. Y., 2002, An Evaluation of the CALPUFF Model and ISCST3 Model by the Tracer Field Experiments, Master's Thesis, Anyang Univ, Gyeonggi-do, Korea.

Jang. Y. K and Song. D. W., 1995, Review of air pollution modeling in Korea, Journal of Korea Air Pollution Research Association, 11, 1,1~14.

Son. J. H, 2005, Compatibility of CALPUFF Model for Modeling of Air Dispersion from a Metropolitan Incinerator, Master's Thesis, Gwangwoon Univ, Gangwon-do, Korea.

Son. G. E., 2014, A study on prediction of High-resolution coastal weather using the WRF and SWAN model, Master's Thesis, Busan Univ, Busan Metropolitan City, Korea.

Oh. J. J., 2010, Air Quality Impact Analysis during Operation of Waste to Energy Facilities", Master's Thesis, Gungook Univ, Seoul, Korea.

Kim. J. Y., 2011, Comparison of Atmospheric Diffusion Models for Msw Incinerator Flue Gas, Master's Thesis, Chungbuk Univ, Chungcheongbuk-do, Korea.

Jun. E. J., 2011, Comparison with prediction and experimental air pollutants using ISCST3 model", Master's Thesis, Hoseo Univ, Chungcheongnam-do, Korea.

Sim. S. H, 2007, "Evaluation of the Diffusion Model for the Atmosphere Diffusion Modeling of the Coastal Area", Master's Thesis, Gwangwoon Univ, Gangwon-do, Korea.

Korea Meteorological Administration, 2013, Annual climatological report.

Korea Meteorological Administration, 2013, Monthly weather report.

The Ministry of Environment, 2013, Operation of the National Waste Incinerators.


Earth Tech, Inc., 2000, CALPUFF model version 5.0: A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model.

Earth Tech, Inc., 2000, CALMET model version 5.0: A User's Guide for the CALMET Meteorological Model.

Lober, M., A. Eschenroeder and R. Robinson, 2000, Testing the USA EPA's ISCST-Version 3 model on dioxins: a Comparison of predicted and observed air and soil concentrations, Atmospheric Environment, 24, 3995~4010.

Skamarock W.C., J. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang and J.G. Powers, 2008, A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR. Mesoscale and Micro scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.

EPA, 1986, 40 CFR Part 51, The Guideline on Air Quality Models(Revised).

 http://typ.kma.go.kr/TYPHOON/statistics/statistics_02_4.jsp?schTyp_type=0&tyNm=&sy=2003&ey=2013&sm=1&em=12&eftp=2&slat=0.0&elat=50.0&slon=0.0&elon=180.0&drtp=0&sotp=0

감사의 글

어느덧 길고도 짧은 대학원 생활을 마무리하며 지난 시간들을 돌이켜보니 많은 아쉬움과 후회가 남습니다. 학업적 성취에 있어서의 아쉬움만이 아닌, 고마운 많은 분들께 감사의 마음을 제대로 전하지 못했기에 더욱 그러한 것 같습니다. 제가 이렇게 성장하기까지 오랜 시간이 걸렸지만 그 세월 속에서 직·간접적으로 힘이 되고 방향을 잡아주셨던 많은 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 본 논문이 완성되기까지 모든 과정을 지켜봐주시고 세심한 지도뿐만 아니라 많은 격려로 부족한 저를 이끌어 주신 이기호 교수님께 깊이 감사드리고 항상 마음속에 간직했던 존경의 마음을 표현합니다. 그리고 제 논문에 대한 지속적인 관심뿐 아니라 물심양면의 지도를 해주신 허철구 교수님께도 깊이 감사의 말을 드리고 존경합니다. 또한 논문 심사 과정에서 제 논문에 면밀한 검토와 자상한 가르침을 주신 감상규 교수님께도 감사드립니다.

대학원생활을 하면서 많은 추억과 보람을 함께 나누었던 조봉, 은석, 명찬, 룡용, 태웅, 정태 학우들에게 감사의 말을 전하고 앞으로 하고자 하는일에 행복이 함께하길 기원하겠습니다.

대기연구실의 문지실장님, 성준, 창진, 지훈, 창환, 태혁, 상훈, 형석, 미연 후배님들 제가 선배로서 많은 도움을 드려야 하는데 그러지 못한점 죄송하고 모두 진심으로 감사합니다. 그리고 연구실을 나와 사회에서 활동하고 있는 우창이에게도 감사의 말을 전합니다.

그리고 해양기상학협동과정에서 제 옆에서 부탁하면 항상 열심히 도와준 민영이형, 그리고 성훈이에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

제주늘푸른평가기술단의 오상호 사장님과 현훈철 전문님 외 단장님, 이사님들, 부장님, 차장님들, 그리고 과장님에게 논문이 완성되기까지 저에게 무한배려와 관심을 주신데 대한 감사의 말을 전합니다.

그리고 내 소중한 친구들 양성환, 한용, 영준, 문성환, 용성, 영훈, 봉우, 김진, 유삼, 동형, 보훈에게 언제나 고맙지만 다시 한번 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 여기서 언급하지 못한 많으분들께도 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로 항상 제곁에서 든든한 버팀목이 되어주시고 못난자식을 믿고 묵묵하게 지켜봐주신 부모님께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 말 안해도 항상 저를 이해해주는 큰

누나, 작은누나에게도 감사의 말을 전합니다. 항상 제편이 되어 힘을 주시고 바르게 생각하고 행동할 수 있도록 키워주신 가족에게 누가 되지 않도록 더욱 성장하도록 노력하겠습니다.

그리고 감사의 글을 쓰고 있는데 미처 생각나지 않아 거론하지 못한 분들께도 죄송하다는 말씀과 함께 감사의 인사를 전합니다.

2015년 01월 09일
대기오염연구실에서 양 기 호

