

대기물리 분과 / 대기물리 2-1

겨울철 깊은 대류와 얇은 대류 발달 및 강수에 대한 잠열의 수치모델 기반 영향 평가

송수민^{1,2}, 김기병^{1,2}, 임교선³, 박소희²

¹서울대학교 기초과학연구원

²한국과학기술연구원 기후·환경연구소

³경북대학교 대기과학과

구름미세물리 모수화 방안 내 대기수상체 상변화 과정에서의 잠열 방출 및 흡수는 열적 환경을 변화시켜 대류의 발달 및 강수의 생성과 관련된 기작들에 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 잠열이 대류의 발달 및 강수에 미치는 영향을 알아보기 위해 Weather Research and Forecasting(WRF) 모델을 활용하여 높이가 3km 이상 발달하는 깊은 대류성 강수 사례와 3km 이하로 낮게 발달하는 얇은 강수 사례에 대해 잠열의 영향이 존재하는 기준 실험과 잠열의 영향을 제거한 민감도 실험을 수행하였다. 두 실험 간의 차이를 분석함으로써, 잠열이 모의된 열역학적 환경과 대기수상체, 그리고 강수에 미치는 영향을 분석하였다. 깊은 대류성 강수 사례의 경우, 강수 발달 초기에 2-km 이상의 고도에서 잠열의 방출과 그 이하의 고도에서 잠열의 흡수가 발생하는 것으로 분석되었다. 이로 인해 강수 발달 초기 상승기류가 유도되고, 그 결과 강수 시스템이 더 깊게 발달하며 지표의 고체형 강수가 증가하는 것으로 나타났다. 얇은 강수 사례의 경우, 잠열이 환경 및 대기수상에 미치는 영향이 깊은 강수 사례 대비 상대적으로 작게 나타났다. 서해상에서 발달되어 한반도를 가로지르며 동진하는 얇은 대류성 강수 사례는 잠열이 존재하는 기준 실험에서 초기 서해상에서 더 많은 강수를 모의하는 것으로 분석되었다. 이후 육지에서는 기준 실험이 민감도 실험에 비해 가강수량 및 지표 강수 모의를 감소시켰다. 해당 수치 실험 결과 분석을 통해 잠열은 열역학적 환경을 변화시킬 뿐만 아니라 지표 강수 유형 및 분포에도 영향을 주는 것을 확인하였다. 또한 깊은 대류성 강수 사례가 얇은 강수 사례보다 잠열의 영향을 크게 받는 것으로 분석되었다.

Keywords: 겨울철 강수, 잠열, 수치모델, 강수 유형

※ 이 연구는 기상청 「위험기상 선제대응 기술개발사업」(RS-2023-00240346)의 지원으로 수행되었습니다.

대기물리 분과 / 대기물리 2-2

해양성 층적운의 운정에서 발생하는 유입 혼합과 연직 운동에 따른 고도별 혼합 특성 모델링

김상겸¹, 라인엽², Fabian Hoffmann³, 임정섭⁴, 염성수^{1,2}

¹연세대학교 대기과학과

²한국과학기술연구원 기후환경연구소

³Meteorological Institute, Ludwig-Maximilians-University

⁴Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado

해양성 층적운에서 수행된 항공 관측 결과에 따르면 운정 근처에서는 비균질 혼합 특성이 나타났고, 구름 내부에서는 균질 혼합 특성이 나타났다. 선행 연구에서는 이를 설명하기 위해 다음과 같은 제안을 하였다. 운정에서는 구름 외부의 공기가 구름 상단으로 유입 및 혼합되며 비균질 혼합 특성이 나타나고, 혼합된 구름 덩어리가 하강하며 내부에서는 균질 혼합 특성이 나타난다. 이러한 과정을 통해 나타나는 균질 혼합 특성은 구름 내부에서 실제로 혼합이 발생하여 만들어진 특성은 아니다. 이 과정에서 혼합된 구름 덩어리의 연직 운동은 혼합된 구름 덩어리와 혼합되지 않은 구름 덩어리의 복사 냉각 차이와 Cloud Top Entrainment Instability (CTEI)에 의해 결정된다. CTEI는 증발 잠열로 인한 냉각과 외부 공기의 유입으로 인한 가열을 바탕으로 혼합 후 구름 덩어리의 열역학적 특성이 어떻게 변할 것인지를 나타내는 척도이다. 또한 복사 냉각의 경우 혼합된 구름 덩어리와 혼합되지 않은 구름 덩어리 간의 차이가 발생하기 때문에, 이에 따라서도 혼합된 구름 덩어리의 연직 움직임이 결정된다. 본 연구에서는 이러한 과정이 모델 내에서도 잘 일어나는지 알아보기 위해 Large Eddy Simulation (LES), Lagrangian Cloud Model (LCM), Linear Eddy Model (LEM)이 결합된 L3 모델을 사용하여 층적운의 운정에서 일어나는 유입 혼합과 구름 내부에서 발생하는 혼합된 구름 덩어리의 연직 운동을 구현해 보고자 한다. 또한 모델 결과로부터 CTEI와 복사 냉각을 계산하고, 이를 바탕으로 혼합된 구름 덩어리의 연직 운동이 발생할 수 있는지를 확인하고자 한다. 운정에서의 비균질 혼합 특성과 구름 내부에서의 균질 혼합 특성 또한 관측과 동일하게 모델에서 구현되는지 살펴볼 것이다. 이 연구를 통해 층적운의 미세물리적, 역학적, 열역학적 특성들에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 층적운, 유입 혼합 과정, CTEI, 복사 냉각, 혼합 특성

※ 이 연구는 연세 시그니처 연구 클러스터 프로그램 (2024-22-0162)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

대기물리 분과 / 대기물리 2-3

ASIA-AQ 캠페인 동안 관측된 NPF event의 특성

안찬우¹, 서표석^{1,2}, Richard H. Moore³, 박민수¹, 박진수⁴, 유희정⁵, 염성수^{1,2}

¹연세대학교 대기과학과
²한국과학기술연구원 기후환경연구소
³NASA Langley Research Center
⁴국립환경과학원 대기환경연구과
⁵국립기상과학원 지구대기감시연구과

대기 중 에어로졸의 상당수는 NPF (new particle formation) events를 통해 생성된다. 이러한 에어로졸 중 일부는 큰 사이즈로 성장하게 되고, 구름응결핵으로 작용할 수 있게 됨에 따라 입자 크기, 알베도, 수명 등 구름의 다양한 성질을 변화시킨다. 본 연구에서는 2024년 미국 항공우주국 (NASA)과 국립환경과학원의 주도하에 수행되었던 ASIA-AQ 캠페인 동안 항공기 DC8에서 관측된 NPF events의 특성에 집중한다. 먼저 필리핀의 경우, 네 번의 비행에서 모두 NPF events가 관측되었다. 그 발생 영역은 마닐라와 마닐라만, 타알 화산, 다구판 시티 총 세 지역으로 모두 고도 1000m 아래에서 발생했다. 필리핀 NPF events만의 특징은 타알 화산에서 방출된 많은 양의 SO₂로 인하여 새로 생성된 입자가 빠르게 성장한 것이다. 한국에서는 총 다섯 번의 비행 중 세 번, NPF events가 관측되었다. 이 중 두 번의 events는 육지에서만 일어났으나 3월 8일 사례는 육지를 포함한 서해상에서도 발생했다. 또한 3월 8일 event는 당시 서해상을 운항 중이었던 국립기상과학원의 기상관측선 기상 1호에서도 관측되었고, 두 관측의 비교는 해당 NPF event가 상층에서 기원하였으며 새로 생성된 에어로졸이 기단을 따라 해수면까지 이동하였음을 보여준다. 태국에서는 총 네 번의 비행 중 한 번, NPF event가 관측되었다. 하지만 타 국가에서의 비행과 비교하여 한 flight lap이 훨씬 길고 그로 인해 하루의 비행이 두 번의 lap으로만 구성되었기에 이후의 성장을 명확하게 판별하기 어려웠다. 마지막으로 대만에서는 세 번의 비행에서 모두 NPF events가 관측되었다. 주로 타이난 시와 자이 현을 중심으로 발생했는데, 두 지역이 지리학적으로 가깝다 보니 flight lap이 거듭됨에 따라 그 사이의 영역에서도 핵화 신호가 관측된 사례도 있었다. 즉 해당 사례 역시 한국에서의 3월 8일 사례와 더불어 NPF events에 의한 영향이 타 지역 혹은 고도까지 확장될 수 있음을 보여준다.

Keywords: ASIA-AQ, new particle formation, 항공 관측, 선박 관측

※ 이 연구는 국립환경과학원 대기오염 측정망 구축 운영 과제 (NIER-2024-03-02-006)와 선박관측을 통한 서해상 대기질 현황 파악(II)(2025-11-0284)의 지원과 연세시그니처 프로그램 (2024-22-0162)의 지원으로 수행되었습니다.

대기물리 분과 / 대기물리 2-4

강수 이온 성분 분석을 이용한 인공증우 수치모델 검증 사례연구

조중현¹, 임윤규¹, 장기호¹, 구해정¹, 씨니항공 인공강우팀, 최용재², 박슬기², 김승범¹

¹국립기상과학원 기상응용연구부

²한국환경공단 K-eco 연구원

인공강우 기술은 산불예방, 가뭄완화, 수자원 확보, 미세먼지 저감 등 다양한 목적으로 전 세계 다양한 국가에서 지속적으로(미국 노스다코타주는 5대 항공기로 65년간 운영중) 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 현재 우리나라에서는 국립기상과학원(NIMS) 주관으로 인공강우 실험이 수행되고 있으며 실험 효과 분석 및 검증을 통해 기술을 개발하고 있다. 특히 인공증우(증설)이 모두 가능하도록 개발된 인공강우 수치모델은 실험 설계 및 분석에 중요한 역할을 하고 있다. 구름 시딩(Cloud Seeding)을 수행한 실험(SEED)과 시딩을 수행하지 않은 실험(NOSEED)간의 수치모의 강수차이로 실험효과를 확인할 수 있다. 또한, 항공기를 이용하여 구름 시딩 실험 후 지상에 내린 강수 샘플에서 실험 물질의 변화가 확인될 경우 영향 지점(범위)로 분석할 수 있다(Ku et al, 2025). 본 연구에서는 그동안의 항공실험에서 관측된 강수 이온 성분 검증 결과에 따라 인공강우 수치모델의 시간별, 공간별 인공증우 수치모의 성능을 평가하고자 한다. 2024년 수행된 실험 중 강수 채수·분석을 수행한 14개의 사례에 대하여 시간에 대해 이온 성분의 변화량과 수치 모델의 증우 결과와의 비교 분석결과, 인공증우 수치모의와 성분변화 사이에는 ± 2시간 이내 차이를 보였다. 이런 평가결과는 수치모의에 의한 인공증우 유효범위가 유의미하고, 이를 이용한 인공증우로 가능한 수자원량의 산정 등 과학적 응용기반으로 활용할 수 있음을 시사한다.

Keywords: 기상조절, 인공증우 실험, 인공증우 수치모델, 인공증우 유효범위

※ 본 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구(KMA2018-00224)의 지원을 받았습니다.

대기물리 분과 / 대기물리 2-5

해양 파동 스펙트럼에 따른 해수면 마이크로파 방출률 모의 영향 분석

이경수¹, 이상무^{1,2}

¹서울대학교 지구환경과학부

²서울대학교 과학데이터혁신연구소

해수면에서 산란 및 방출되는 마이크로파 복사는 대기와 상호작용 후 대기 상단에 도달하기 때문에 이를 정확하게 계산하는 것은 대기 복사 전달 모델에서 매우 중요하다. 또한, 이는 수치모델의 인공위성 자료동화나 해양 지역의 원격탐사 알고리즘을 개발할 때 필수적으로 활용된다. 현재 여러 수치모델이나 위성 알고리즘에서는 해수면의 마이크로파 복사 계산을 위해 FASTEM (FAST microwave Emissivity Model)이 사용되고 있는데, 이 모델은 단순한 모수화를 이용하여 계산 속도가 매우 빠른 장점이 있지만, 해수면 복사의 물리적 성질이 상당 부분 생략되어 다양한 편광 성분을 계산할 수 없고 모델의 추가적인 개선이 어렵다는 한계점이 존재한다. 따라서 향후 마이크로파 복사 관측을 수치모델이나 지구환경변수 산출 알고리즘에 효과적으로 활용하기 위해서는 기존의 방법과 달리 해수면의 마이크로파 반사도 및 방출률을 물리적인 방법을 통해 정확하면서도 빠르게 계산하는 모델의 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 우선 여러 선행 연구를 기반으로 여섯 개의 하부 모듈(프레넬 반사도, 해수면 유전율, 해양 파동 스펙트럼, 소규모 섭동 모델, 해수 거품 모델, 대규모 파동 보정 모델)로 이루어진 해수면 마이크로파 방출률 계산 모델을 구성한 후, 하부 모듈의 설정이 전체 계산 결과에 주는 영향을 분석하고자 하였다. 특히 이 연구에서는 해양 파동 스펙트럼과 소규모 섭동 모델 사이의 관계를 면밀히 살펴보았다. 소규모 섭동 모델은 해수면에 존재하는 작은 규모의 표면중력파(capillary wave)에 의해 전자기파가 산란 및 방출되는 물리적 과정을 표현하는 모델로, 해수면 방출률 모델의 하부 모듈 중에서 가장 핵심적인 부분을 구성한다. 이때 표면중력파가 분포하는 정도는 해양 파동 스펙트럼을 통해 표현된다. 해양 파동 스펙트럼은 해수면의 파동이 파수별로 어느 정도의 에너지를 가지는지를 나타내며, 보통 해수면 부근의 바람에 대한 함수로 표현되는데 제시되는 형태가 연구에 따라 매우 다양하다. 따라서, 본 연구에서는 그 특성을 다각적으로 분석하였다. 여러 종류의 스펙트럼에서 파장에 따른 파동의 등방적인 에너지 분포는 대체로 유사하지만, 풍향에 따른 에너지 분포는 상당히 다르게 표현되고 있다. 이와 같은 스펙트럼의 차이는 천정각이 50° 부근일 때 해수면의 마이크로파 밝기온도를 수직 편광에서 약 2 K, 수평 편광에서 약 2.5 K 변화시켰다. 이는 실제 소규모 섭동에 의한 밝기 온도 변화의 크기와 유사한 수준으로, 해양 파동 스펙트럼의 선택이 해수면 마이크로파 복사 계산 자체에 상당한 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 이에 따라 본 연구에서 사용된 해수면 마이크로파 방출률 계산 모델은 추후 위성 관측과의 비교 등을 통해 최적의 해양 파동 스펙트럼을 선택할 수 있도록 구성하였고, 이를 통해 방출률 모델의 성능을 향상시킬 수 있다.

Keywords: 해수면 마이크로파 복사, 복사전달모델, 해양 파동 스펙트럼

※ 이 연구는 기상청 수치모델링센터 KMA2018-00721의 지원을 받아 수행되었습니다.

Evaluation of Aerosol Direct and Indirect Effects on the East Asian Spring Climate through WRF-Chem simulations

Joo Hyun Lee, Young-Hee Ryu

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

해수면에서 산란 및 방출되는 마이크로파 복사는 대기와 상호작용 후 대기 상단에 도달하기 때문에 이를 정확하게 계산하는 것은 대기 복사 전달 모델에서 매우 중요하다. 또한, 이는 수치모델의 인공위성 자료동화나 해양 지역의 원격탐사 알고리즘을 개발할 때 필수적으로 활용된다. 현재 여러 수치모델이나 위성 알고리즘에서는 해수면의 마이크로파 복사 계산을 위해 FASTEM (FAST microwave Emissivity Model)이 사용되고 있는데, 이 모델은 단순한 모수화를 이용하여 계산 속도가 매우 빠른 장점이 있지만, 해수면 복사의 물리적 성질이 상당 부분 생략되어 다양한 편광 성분을 계산할 수 없고 모델의 추가적인 개선이 어렵다는 한계점이 존재한다. 따라서 향후 마이크로파 복사 관측을 수치모델이나 지구환경변수 산출 알고리즘에 효과적으로 활용하기 위해서는 기존의 방법과 달리 해수면의 마이크로파 반사도 및 방출률을 물리적인 방법을 통해 정확하면서도 빠르게 계산하는 모델의 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 우선 여러 선행 연구를 기반으로 여섯 개의 하부 모듈(프레넬 반사도, 해수면 유전율, 해양 파동 스펙트럼, 소규모 섭동 모델, 해수 거품 모델, 대규모 파동 보정 모델)로 이루어진 해수면 마이크로파 방출률 계산 모델을 구성한 후, 하부 모듈의 설정이 전체 계산 결과에 주는 영향을 분석하고자 하였다. 특히 이 연구에서는 해양 파동 스펙트럼과 소규모 섭동 모델 사이의 관계를 면밀히 살펴보았다. 소규모 섭동 모델은 해수면에 존재하는 작은 규모의 표면중력파(capillary wave)에 의해 전자기파가 산란 및 방출되는 물리적 과정을 표현하는 모델로, 해수면 방출률 모델의 하부 모듈 중에서 가장 핵심적인 부분을 구성한다. 이때 표면중력파가 분포하는 정도는 해양 파동 스펙트럼을 통해 표현된다. 해양 파동 스펙트럼은 해수면의 파동이 파수별로 어느 정도의 에너지를 가지는지를 나타내며, 보통 해수면 부근의 바람에 대한 함수로 표현되는데 제시되는 형태가 연구에 따라 매우 다양하다. 따라서, 본 연구에서는 그 특성을 다각적으로 분석하였다. 여러 종류의 스펙트럼에서 파장에 따른 파동의 등방적인 에너지 분포는 대체로 유사하지만, 풍향에 따른 에너지 분포는 상당히 다르게 표현되고 있다. 이와 같은 스펙트럼의 차이는 천정각이 50° 부근일 때 해수면의 마이크로파 밝기온도를 수직 편광에서 약 2 K, 수평 편광에서 약 2.5 K 변화시켰다. 이는 실제 소규모 섭동에 의한 밝기 온도 변화의 크기와 유사한 수준으로, 해양 파동 스펙트럼의 선택이 해수면 마이크로파 복사 계산 자체에 상당한 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 이에 따라 본 연구에서 사용된 해수면 마이크로파 방출률 계산 모델은 추후 위성 관측과의 비교 등을 통해 최적의 해양 파동 스펙트럼을 선택할 수 있도록 구성하였고, 이를 통해 방출률 모델의 성능을 향상시킬 수 있다.

Keywords: 해수면 마이크로파 복사, 복사전달모델, 해양 파동 스펙트럼

※ 이 연구는 기상청 수치모델링센터 KMA2018-00721의 지원을 받아 수행되었습니다.