

수치 모델을 활용한 남반구 극관 열권에서의 이온-중성대기
상호작용 연구

Investigation of the ion-neutral coupling in the southern
polar cap thermosphere using numerical model

2024. 11. 27

한국해양과학기술원
부설 극지연구소

UST Young Scientist+ 양성 사업 최종보고서

UST Young Scientist+ Research Program Final Report

과제번호 Grant Number		PG23090				
과제명 Project Title	국문 Korean	수치 모델을 활용한 남반구 극관 열권에서의 이온-중성대기 상호작용 연구				
	영문 English	Investigation of the ion-neutral coupling in the southern polar cap thermosphere using numerical model				
스쿨/캠퍼스 School • Campus		극지연구소		전공 Major	극지과학	
UST 학생 UST Student	성명 Name	함영배	학위과정 Course	통합	연락처 Contact	(E-mail) astro422@kopri.re.kr (Mobile) 010-2964-2052
지도교수 Advisor	성명 Name	지건화	직급/직위 Position	책임연구원 (전임교원)	연락처 Contact	(E-mail) ghjee@kopri.re.kr (Mobile) 010-2967-6132
연구기간 Period	2023.12.01. ~ 2024.11.30.			총연구비 Grants	15,750,000	원 KRW

2022년도 UST Young Scientist+ 양성 사업 최종보고서를 붙임과 같이 제출합니다. 보고서에는 사실과 다른 내용이 포함되지 아니하였으며, 만약 허위사실이나 중대한 오류가 발견될 경우에는 그에 상응하는 불이익을 감수할 것임을 서약합니다.

I hereby submit the Final Report of 2023 UST Young Scientist+ Research Program as attached. To the best of my knowledge, all of the information included in my report is true and I will take any penalty if false information or serious error is found in my report.

첨부 : 최종보고서 1부.

Attachment: Final Report

2024. 11. 27.

UST 학생
UST Student

:

함영배

(서명)

Signature

지도교수
Advisor

:

지건화

Signature

과학기술연합대학원대학교 총장 귀하

To the President of University of Science and Technology

요 약 문

I. 제목

수치 모델을 활용한 남반구 극관 열권에서의 이온-중성대기 상호작용 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 관측-모델 비교 분석에서 확인되는 전리권 이온 속도의 큰 차이
- 수치 모델의 기본 입력 값의 부정확도
- 수치모델 개선을 통한 남반구 극관 열권에서의 이온-중성대기 상호작용 기작 이해

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 모델 입력 값 대체를 위한 대체 자료 데이터베이스 구축
- 변경한 입력 값을 통한 수치 모델 시뮬레이션 수행
- 모델 시뮬레이션 결과의 관측과의 비교 및 개선도 평가

IV. 연구개발결과

- 수치 모델 수행 기반 및 모델 대체 입력 값 데이터 베이스 구축
- 수치 모델 이온 속도 모사 정확도 개선

V. 연구개발결과의 활용계획

- 수치 모델을 활용한 2024년 5월 수퍼 스톱기간 열권-전리권 시뮬레이션 수행 및 관측과의 비교

S u m m a r y

I . Title

Investigation of the ion-neutral coupling in the southern polar cap thermosphere using numerical model

II . Purpose and Necessity of R&D

- Large difference in the comparison of the ion drift between model and observation
- Uncertainty in the default inputs of a numerical model
- Understanding of the ion-neutral coupling in the southern polar cap thermosphere through an improvement of a numerical model

III . Contents and Extent of R&D

- Establishment of an alternative database for the replacement of default model inputs
- Performing a numerical model simulation using the alternative model inputs
- Estimation and comparison of the simulation results with observation

IV . Results of R&D

- Establishment of the base for numerical model runs and of the alternative model input database
- Improvement of the accuracy in the ion velocity estimation of a numerical model

V . Application plan of R&D results

- Performing a numerical model simulation for the 2024 Mother's day super storm and comparison with observation

목 차

I. 연구 개요	(6)
1. 연구 필요성	(6)
2. 연구목표	(7)
3. 연구내용	(7)
II. 연구 수행내용 및 과정	(7)
1. 사업 추진전략	(7)
2. 연구 수행사항	(7)
III. 연구 수행결과 및 목표달성 수준	(11)
1. 연구 수행결과	(11)
2. 목표달성 수준	(12)
IV. 연구 성과 및 관련 분야 기여도	(12)
V. 연구결과의 활용방안	(12)
VI. 참고문헌	(13)
VII. 주요 연구실적	(14)
1. 연구실적 요약	(14)
2. 학술지 논문	(14)
3. 학회 논문	(14)
4. 특허출원·등록	(14)
5. 대내·외 수상	(14)
VIII. 국외출장 현황	(15)
IX. 전문가 교류내역	(15)
X. 연구비 집행 현황	(16)
XI. 지도교수 의견	(16)

C O N T E N T S

I. Overview	(6)
1. Necessity of the study	(6)
2. Objective of the study	(7)
3. Contents of the study	(7)
II. Research content and process	(7)
1. Strategy of R&D	(7)
2. Contents of R&D	(7)
III. Research result and achievement	(11)
1. Results of R&D	(11)
2. Achievement of R&D	(12)
IV. Research performance and contribution	(12)
V. How to use research results	(12)
VI. References	(13)
VII. Project outputs	(14)
1. Summary	(14)
2. Journal paper	(14)
3. Conference paper	(14)
4. Patent application & registration	(14)
5. Award	(14)
VIII. Overseas business trips	(15)
IX. Network of experts	(15)
X. Research expenses	(16)
XI. Advisor's Comments	(16)

I. 연구개요

1. 연구필요성

- 극지연구소에서 운영하고 있는 남극 장보고과학기지에서는 다양한 지상관측을 통해 자기권-전리권-열권 변화를 관측하고 있음
- 특히, 극지연구소에서는 극지 고층대기 열권 바람 (패브리 페로 간섭계)과 전리권 이온 바람 (전리권 레이더)을 동시에 관측하여 자기권을 통해 극지 전리권으로 전달된 태양 에너지가 극지 열권으로 전달되는 물리적 기작 규명 연구 수행

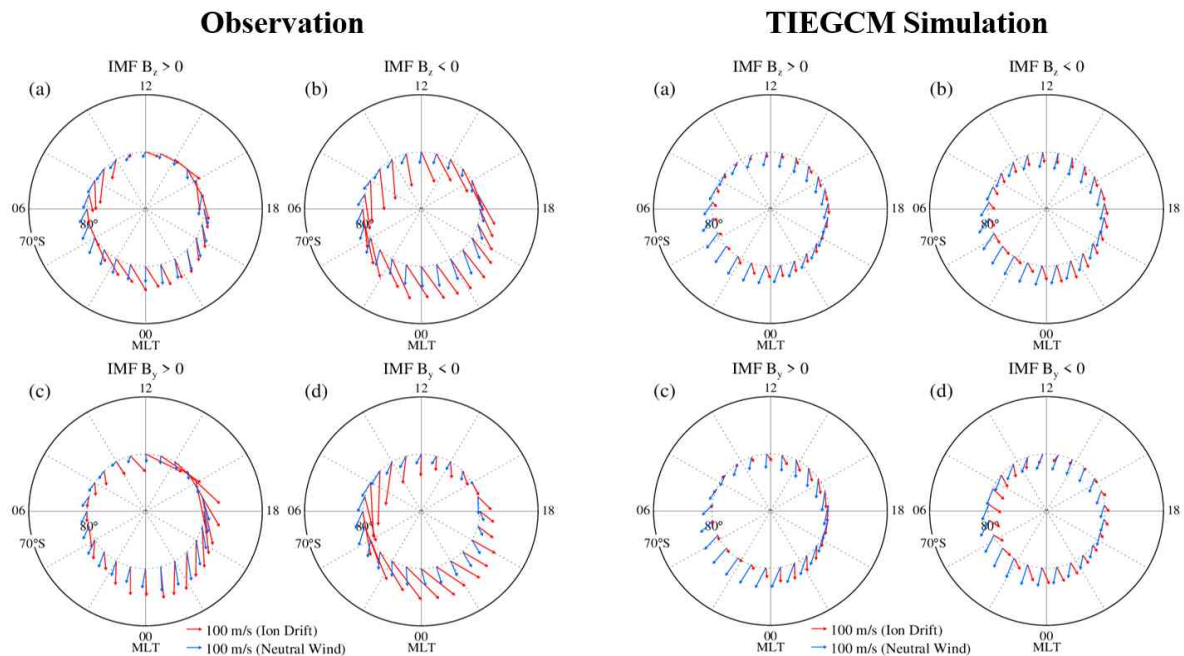


그림 1. 남극장보고기지 관측 자료 분석을 통해 얻은 전리권 이온 바람 및 열권 바람 (왼쪽) 및 TIEGCM 수치 모델의 전리권 바람 및 열권 바람 모사 결과 (오른쪽)

- 극지연구소 남극 장보고기지 열권/전리권 동시 관측 자료를 활용한 전리권 이온 바람이 열권 바람에 미치는 영향에 관한 연구에서 관측 자료 분석과 더불어 수치 모델 결과와의 비교 결과, 관측과 수치 모델 사이에 상당한 차이가 있음을 확인
 - ▷ 수치 모델 결과가 실제 관측과는 다른 것에 대한 원인 규명이 필요
- 관측 자료 기반의 연구에서, 복잡하고 다양한 물리적 기작이 포함된 현상에 대한 해석은 물리적 기작에 대한 단순화 및 가정을 전제로 이루어짐
 - ▷ 이러한 관측 자료 기반의 연구에서 이루어진 해석에 적용된 단순화 및 가정을 검증하고, 단순화 과정으로 인해 고려되지 않은 물리 기작들의 추가적인 영향을 확인하는 관점에서 수치 모델은 강력한 도구로 사용될 수 있음

2. 연구목표

- 관측과 수치 모델 결과 간의 차이에 대한 원인 규명
- 남반구 극관 지역에서의 수치 모델 성능 개선

3. 연구내용

- Thermosphere Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model (TIEGCM)을 활용한 전리권-열권 모사
- 수치모델 입력 값 개선 작업을 통한 이온 바람의 모사 정확도 개선
- 중성대기-이온 간 상호작용에 영향을 미치는 요소 파악 및 이를 통한 열권 바람 모사 정확도 개선

II. 연구 수행내용 및 과정

1. 사업 추진전략

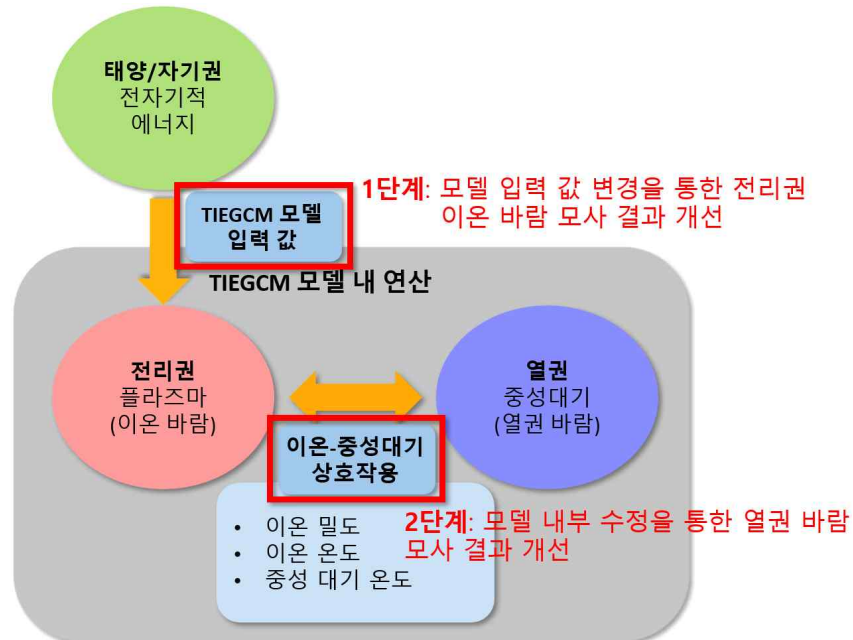


그림 2. 사업 추진 전략을 도식화한 그림

2. 연구 수행사항

- TIEGCM에서의 이온 속도

Assumptions:

Hydrostatic assumption, constant gravity, steady-state ion and electron energy equations. Ion momentum equations are not solved explicitly; ion velocities are obtained from ExB drifts. Hydrogen and helium and their ions are not presently included in the model. A simplified relationship is used for photoelectron heating. The upper boundary conditions for electron heat and flux transfer are simple empirical specifications. CO2 is not solved explicitly but is specified assuming diffusive equilibrium. Eddy diffusion uses a simplified formulation.

그림 3. TIEGCM 모델에서 사용되는 가정 (<https://www.hao.ucar.edu/modeling/tgcm/tie.php>)

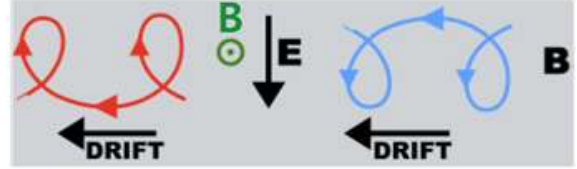
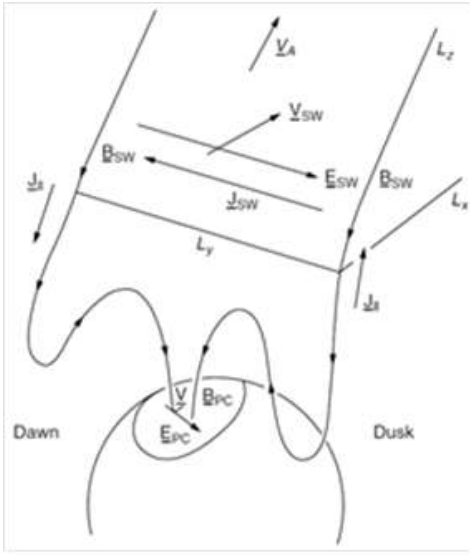


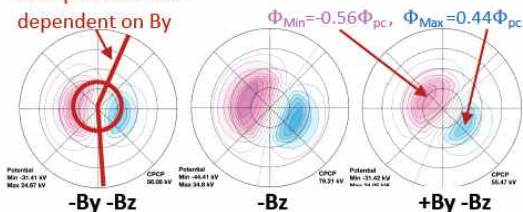
그림 4. 태양풍으로부터 지구로 전달되는 전기장을 도식화한 그림 (작: Kelley [1989], Academic Press) 및 전기/자기장이 존재할 때 플라스마의 움직임 (https://en.wikipedia.org/wiki/Guiding_center)

- ▷ TIEGCM은 고도 약 97 ~ 700km 구간에서의 열권, 전리권 상태를 모사하는 수치 모델로써, 전리권 이온 속도는 운동방정식을 풀으로써 결정하지 않고 $E \times B$ drift로 결정함 (그림 3)
- ▷ 고위도 전리권에서의 전기장은 지구의 자기장을 따라 전달된 태양풍 전기장에 해당하며, 따라서 지구의 고위도 지역에서의 전기장은 태양풍의 속도와 태양풍 자기장 성분에 따라 변화함
- ▷ 때문에 고위도 전리권 플라스마의 상태를 모사함에 있어 가장 이상적인 것은 전리권 모델을 자기권-태양풍 수치 모델에 접합시키는 것이나, TIEGCM에서는 두 가지 경험모델 (Heelis 또는 Weimer 모델)을 사용하여 고위도 지역에 전위 (즉 전기장)를 주고 있음

Heelis model¹

- Mathematical model of large-scale global convection pattern.
- Parameterized by IMF B_y & transpolar voltage, Φ_{pc} .
- Only valid for southward IMF, $-B_z$.
- Includes <100 Dynamic Explorer 2 (DE-2) passes.
- Model properties such as convection reversal radius, θ_0 , are defined as relationships with Φ_{pc} and/or B_y .

Zero potential line dependent on B_y



Weimer model²

- DE-2 satellite measurements to create empirical model of potential patterns.
- DE-2 operational Aug 1981- Mar 1983.
- 2604 valid passes.
- Parameterized by IMF B_y , B_z , SW velocity, SW density & dipole tilt.
- Calculates potential for geomagnetic grid.
- Lower boundary constructed from the ends of every polar pass where the electric field or magnetic perturbations go to zero.

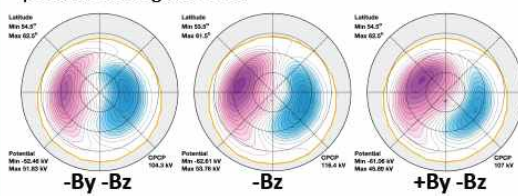


그림 5. Heelis 및 Weimer 이온 대류 모델 (<https://ras.ac.uk/nam-2021/lauren-orr>)

- ▷ 따라서 앞선 남반구 고위도 지역에서 확인된 관측-모델간의 이온 속도 차이는, 위 사항들을 미루어보았을 때 경험모델로부터 취해지는 고위도 전기장 입력 값의 부정확도로부터 기인하는 것으로 보임

○ 경험모델의 산출 값 변경을 통한 고위도 전기장 입력 값 변경

- ▷ 먼저 고위도 전기장을 변화시켰을 때 이온 속도의 변화가 어떻게 나타나는지 확인하기 위해 이전 연구에서 사용했던 Weimer 모델의 전위 산출 값에 상수 (1.5)를 곱해 임의로 전기장을 키우는 테스트 진행

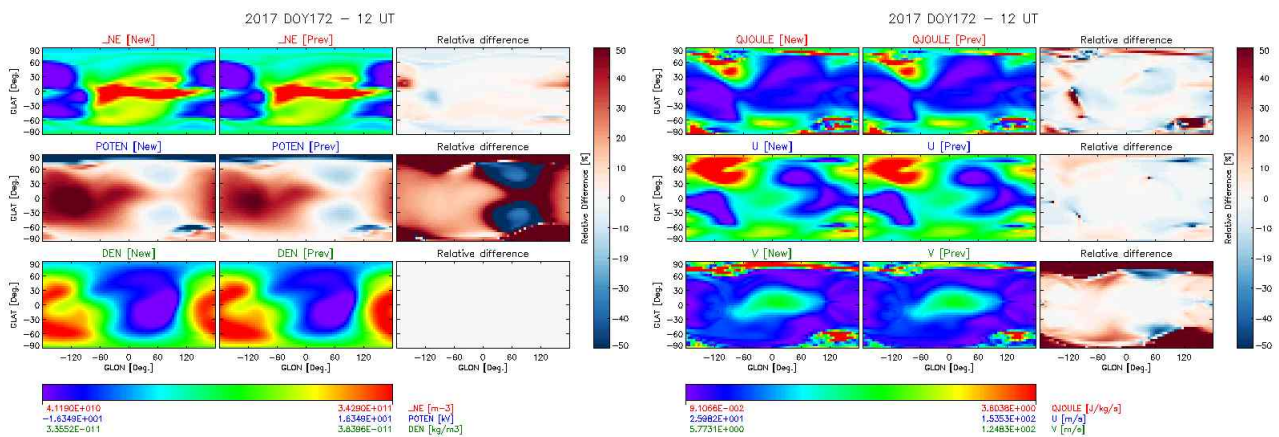


그림 6. Weimer 모델 전기장을 1.5배 크게 했을 때 (1열), 기본 Weimer 모델 전기장을 사용했을 때 (2열)의 모델 장의 변화. 3열은 이 둘의 상대적인 차이 (_NE: 전자밀도, POTEN: 전위, DEN: 중성대기 밀도, QJOULE: 줄 발열, U: 중성 바람, V: 이온 속도)

- ▷ 그림 6에서와 같이, 고위도로 입력되는 전기장을 50% 크게 했을 때 다양한 장에서 변화가 나타남
- ▷ 특히 그림 6 우측 가장 아래 이온 속도 (V)의 경우, 이온 속도가 전기장을 키운 이후 증가하였으며, 증가된 정도는 정확히 50%로 나타남
- ▷ 따라서 고위도 지역에서 이온 속도는 이 지역에 입력되는 전위 값, 즉 전기장에 선형적으로 비례 ($V=E \times B/B^2$)함을 확인
- ▷ Weimer 모델의 전위 값을 증가시키는 방법으로 모델에서 모사되는 이온 속도의 크기를 키울 수 있었으나, 문제는 모사되는 이온 속도를 관측치 수준으로 만들기 위해서는 전위 값을 너무 큰 값 (3배)으로 증가시켜야 함

○ 자료동화를 통한 고위도 전위 입력 값 수정

- ▷ 전기장은 전위 값 자체가 커짐으로써 증가할 수 있으나, 전기장은 전위의 구배로 주어지기에 ($E=-\nabla\phi$) 전위의 분포 형태에 따라서도 변할 수 있음
- ▷ 따라서 단순히 전위의 크기뿐만 아닌 전위의 형태도 고려되어야 함
- ▷ 이를 위해 TIEGCM의 고위도 전위 입력 값으로써, 통상적으로 사용되는 Heelis나 Weimer 경험모델 값이 아닌 자료동화 결과를 사용하기로 함

- ▷ TIEGCM에는 고위도 입력 값으로 Assimilative Mapping of Ionospheric Electrodynamics (AMIE)가 사용된 적이 있으며, 이를 위한 모듈이 존재함
- ▷ 하지만 AMIE 자료동화의 경우 이를 사용하기 위한 자료 준비에 많은 시간이 소요되며 과정 또한 복잡하기에, 제한적으로 사용되고 있음
- ▷ 본 연구에서는 AMIE 자료가 아닌, 최근 새로 개발된 Assimilative Mapping of Geospace Observations (AMGeO) 자료를 사용하여 TIEGCM에 자료동화 고위도 입력 값을 사용하기로 함
- ▷ AMGeO의 경우 SuperDARN, SuperMAG 지상자료 및 AMPERE 위성 자료를 사용하여 고위도 지역의 전기역학 관련된 값 (전위, 전도도, 줄 발열 등)을 산출



III. 연구 수행결과 및 목표달성 수준

1. 연구 수행결과

- 고위도 입력 값으로 AMGeO를 사용하는 것뿐만 아니라, 2024년 6월 새로운 버전의 모델 (TIEGCM 3.0)이 공개됨에 따라 TIEGCM 모델도 2.0 버전이 아닌 3.0 버전을 사용함

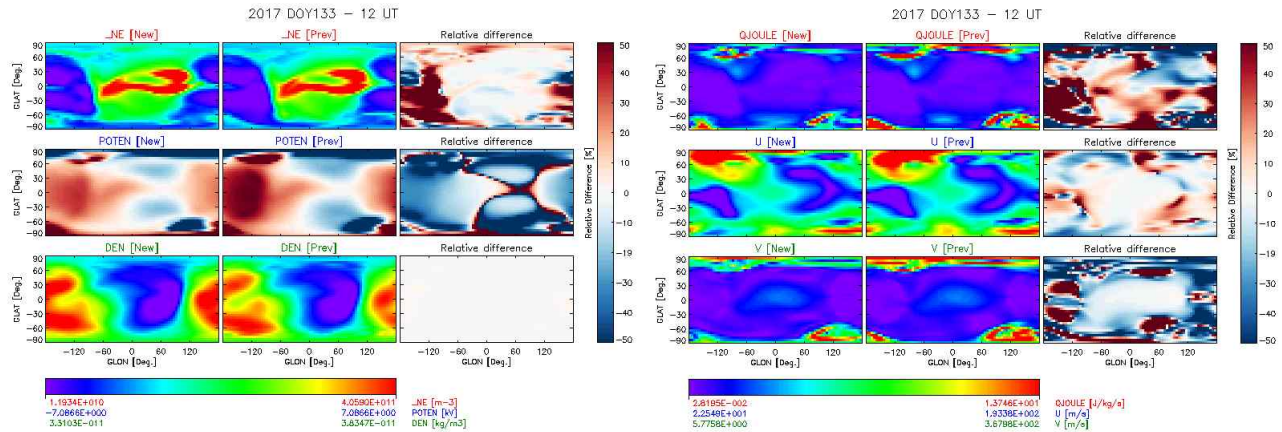


그림 7. 그림 6과 같으나, 1열은 AMGeO를 사용했을 때의 결과

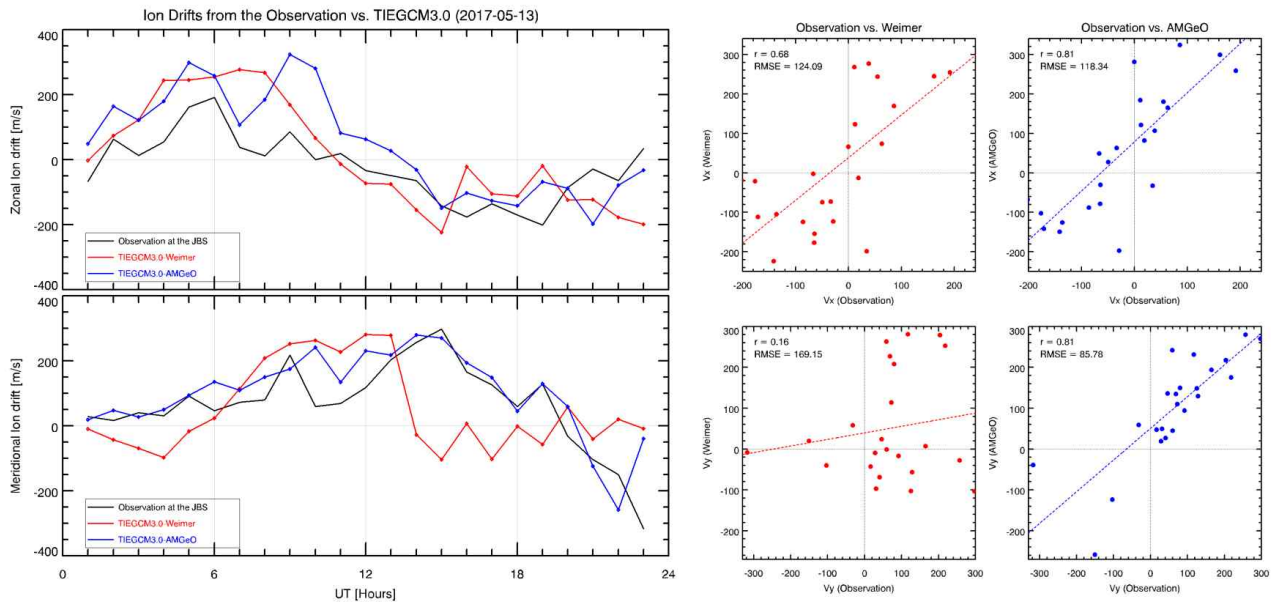


그림 8. 좌측 패널: 이온 속도의 남극장보고과학기지에서 관측치 (검은색)와 관측 지점과 가까운 격자에서의 모델 결과 (빨간색: Weimer를 고위도 입력 값으로 사용한 경우, 파란색: AMGeO를 고위도 입력 값으로 사용한 경우). 우측 패널: 이온 속도의 관측-모델 결과의 유사도를 각각의 모델에 대해 확인한 결과

- TIEGCM 3.0 버전에서 AMGeO를 고위도 입력 값으로 사용했을 때, 기존 Weimer를 사용했을 때보다 이온 속도가 관측치와 더 유사하게 나타남
- 관측치와 모델 모사 결과와의 유사도를 정량적으로 평가하기 위해 피어슨 상관 계수 및 RMSE를 계산하였으며, 결과는 표 1과 같음

	TIEGCM3.0-Weimer		TIEGCM3.0-AMGeO	
	동-서 성분	남-북 성분	동-서 성분	남-북 성분
피어슨 상관계수	0.68	0.16	0.81	0.81
RMSE	124.09	169.15	118.34	85.78

표 1. 서로 다른 고위도 입력 값에 대한 모델의 이온 속도 모사 결과의 유사도

2. 목표달성 수준

- 본 사업 기획 당시에 추진체계로써 ‘1단계: 모델 입력 값 변경을 통한 전리권 이온 바람 모사 결과 개선’ 및 ‘2단계: 모델 내부 수정을 통한 열권 바람 모사 결과 개선’ 두 목표를 제시하였으나, 사업 종료 시점에서는 1단계까지 완료함
- 목표 달성도는 50%로, 2단계는 현재 진행 중

IV. 연구 성과 및 관련 분야 기여도

- 외부로부터 고위도지역으로 유입되는 전자기적 에너지는 열권-전리권 모델의 정확도 향상을 위해 필수적인 사항으로 알려져 있음 (Sarris, [2019])
- 본 사업에서는 TIEGCM에 자료 동화 플랫폼인 AMGeO를 적용하여 열권-전리권 모델 시뮬레이션을 수행하였음
- TIEGCM에 최신 플랫폼인 AMGeO 결과를 적용한 연구는 현재까지 없는 것으로 확인되며, 따라서 본 사업에서 수행한 연구결과는 AMGeO를 사용하였을 때 TIEGCM의 열권-전리권 모사 성능 향상에 얼마나 기여할 수 있는지 제시할 수 있음

V. 연구결과의 활용방안

- 본 사업에서 사용한 수치모델을 올해 2024년 5월에 있었던 수퍼 스톰에 적용하여 남극장보고과학기지 관측 자료와 모델 자료를 비교하는 논문을 투고 예정
- 본 사업의 연구 결과는 선행된 관측 기반의 연구를 수치모델을 활용하여 살펴본 것으로, 연구 주제의 연속성 및 개연성이 있어 학위 논문에 포함될 예정
- 본 사업에서 수치모델을 처음으로 활용하였으며, 본 사업에서의 경험을 살려 졸업 후 수치모델을 활용한 연구를 수행할 예정

VI. 참고문헌

Thermosphere Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model (n. d.). NCAR-HAO, Retrieved November 25, 2024, from <https://www.hao.ucar.edu/modeling/tgcm/tie.php>

Guiding center (n. d.). Wikipeda, Retrieved November 25, 2024, from https://en.wikipedia.org/wiki/Guiding_center

T. Matsuo, L.M. Kilcommons, W. Mirkovich, J.M. Ruohoniemi, S. Chakraborty, B.J. Anderson, and S.K. Vines. Assimilative Mapping of Geospace Observations (AMGeO): Unified Global and Local Perspectives on Highlatitude Ionospheric Electrodynamics. In AGU Fall Meeting Abstracts, volume 2020, pages SA026-03, dec 2020.

L. Orr, A. Grocott, M.-T Walach, G. Chisham, M.P. Freeman, R.M. Shore, and M.M. Lam (2021). Quantitative comparison of high latitude ionospheric electric field models [Poster presentation], National Astronomy Meeting 2021, University of Bath, <https://ras.ac.uk/nam-2021/lauren-orr>

T.E. Sarris (2019). Understanding the ionosphere thermosphere response to solar and magnetospheric drivers: status, challenges and open issues, Phil. Trans. R. Soc. A, 377: 20180101, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2018.0101>

VII. 주요 연구실적

1. 연구실적 요약

학술지 논문	학회논문	특허 출원	특허 등록	대내외 수상
0 건	2 건	0 건	0 건	0 건

2. 학술지 논문

No.	논문제목	학술지명	저자순	게재연월	국내/국외	SCI 여부

3. 학회 논문

No.	논문제목	학회명	저자순	게재연월	국내/국외	발표 유형
	Ion convection and its impacts on the thermospheric winds from the TIEGCM simulation in the southern polar cap region	2024 CEDAR Workshop	함영배, 지건화	2024.6.	국외	Poster
	TIEGCM Simulations of Ion Drift in Comparison with the Observations in the Southern Polar Cap Region	한국우주과학회 2024 가을학술대회	함영배, 지건화	2024.10.	국내	Poster

4. 특허출원 · 등록

No.	특허명	출원일	등록일	국가명	등록번호	비고

5. 대내 · 외 수상

No.	수상명	수상등급	수여기관	수여일자

VIII. 국외출장 현황

No.	출장기간	출장자	국가	지역	출장목적	학회/ 행사명	발표제목	연구비 사용여부	
								참가비	여비
1	2024.6.8. - 2024.6.16	함영배	미국	샌디에고	연구결과 발표 및 연구논의	2024 CEDAR Workshop	Ion convection and its impacts on the thermospheric winds from the TIEGCM simulation in the southern polar cap region	590,281	5,880,701

IX. 전문가 교류내역

No.	전문가 정보			교류내용	교류일자	비고
	성명	소속	직위			
1	Qian Wu	미국 NCAR/HAO	Project Scientist	FPI 관측 자료 분석 관련 논의 (FPI로 관측한 중성 바람에서 wave activity 관련 정보 산출 가능성)	2024.6.12.	
2	Wenbin Wang	미국 NCAR/HAO	Project Scientist	TIEGCM 활용 연구 진행방향 논의 (고위도 지역 neutral wind의 경우 heating에 의해서도 영향을 받을 수 있는 바, electric potential 뿐만 아닌 auroral heating에 의한 효과 또한 고려)	2024.6.12.	
3	Haonan Wu	미국 NCAR/EDEC	Postdoc	TIEGCM 3.0 사용 방법 및 개선 사항 논의	2024.6.9.	
4	송인선	연세대학교	부교수	TIEGCM 2.0-3.0 버전에서 나타나는 이온 속도의 큰 차이, AMGeO 사용 방법, WACCM과 TIEGCM의 결과 비교에 대한 논의	2024.10.29 ·	
5	송병권	연세대학교	박사후 연구원	Gravity wave parameterization의 부정확도가 고위도 상부 열권 바람에 미칠 수 있는 영향 논의	2024.10.30 ·	

X. 연구비 집행 현황

세 목	책정금액(A)	집행금액(B)	집행률(B/A)
학생인건비	0	0	0%
연구시설·장비비	4,350,000	4,122,800	94.78%
연구재료비	0	0	0%
연구활동비	10,550,000	7,715,822	73.14%
회의비	100,000	100,000	100%
간접비	750,000	750,000	100%
합 계	15,750,000	12,688,622	80.56%

XI. 지도교수 의견

본 과제의 수행을 통해 과제 기획 및 수행, 연구비 집행, 보고서 작성 등, 연구자로서 실제 연구수행 이외의 다양한 측면에서 학생에게 좋은 경험이 되었을 것으로 생각합니다. 다만 연구비 집행에서 너무 많은 제약이 있어 실제 예산 활용에 아쉬움이 있었던 것 같습니다.



주 의

1. 이 보고서는 과학기술연합대학원대학교 (UST)주관으로 극지연구소에서 수행한 Young Scientist+ program 연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술연합대학원대학교 (UST)주관으로 극지연구소에서 수행한 Young Scientist+ Program 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

