

BSPE17270-042-13

고위도 열권 바람, 온도 감시를 위한
FPI 분석 기술 개발

Development of the FPI analysis technique for high
latitude thermospheric wind and temperature observations



2018. 03. 30

한국해양연구원
부설 극지연구소

편집순서 2

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 고위도 열권 바람, 온도 감시를 위한 FPI 분석 기술 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

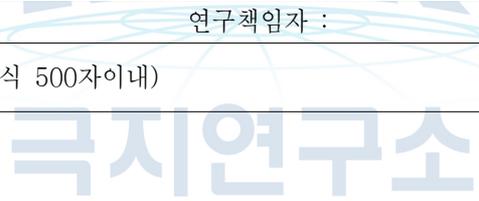
2018. 3. 26

연구책임자 : 이창섭

참여연구원 : 권혁진
함영배
김은솔

편집순서 3

보고서 초록

과제관리번호	PE17270	해당단계 연구기간	2017.4 - 2018.3	단계 구분	(1) / (1)
연구사업명	중 사업명	극지연구소 주요사업			
	세부사업명	신진연구원 지원과제			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	고위도 열권 바람, 온도 감시를 위한 FPI 분석 기술 개발			
연구책임자	이창섭	해당단계 참여연구원수	총 : 6 명 내부 : 3 명 외부 : 3 명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 기후과학연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
					42
					
<ul style="list-style-type: none"> ● FPI 원시자료에 대한 접근성 확보 ● 이미지 프로세싱을 통한 원시자료의 질 개선 ● annular summing 기법을 활용한 신호대 잡음비 개선 수행 ● 현장 활동을 통한 Etalon 정렬 기술 확보 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	FPI, 열권, 바람, 온도, Etalon			
	영어	FPI, thermosphere, wind, temperature, Etalon			

요 약 문

I. 제 목

고위도 열권 바람, 온도 감시를 위한 FPI 분석 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 고층대기 온도, 바람을 동시에 관측 가능한 FPI 분석 기술 부재
- 국제적인 FPI 관측 네트워크 구성을 위한 전문적인 분석 기술 필요
- 남, 북극 FPI 관측 결과 비교를 통한 양극 지역에서의 대기 물리적 특성 이해

III. 연구개발의 내용 및 범위

- FPI 관측 원리 이해도 향상
- FPI 원시자료 접근성 확보
- 관측 자료 품질 극대화를 위한 이미지 프로세싱 수행
- 도플러 분석을 이용한 최종 분석 결과 도출

IV. 연구개발결과

- FPI 원시자료 이미지 프로세싱 프로그램
- FPI 자료 분석 코드
- 안정적인 관측 자료 확보를 위한 Etalon 정렬 기술 확보

V. 연구개발결과의 활용계획

- 다른 과장대의 대기광 관측 자료에 적용한 다양한 고도에서의 FPI 연구에 활용
- FPI 관측 결과와 유사한 활용성을 가지는 지상 관측, 위성 관측 결과와의 비교

S U M M A R Y

I. Title

Development of the FPI analysis technique for high latitude thermospheric wind and temperature observations

II. Research goals and background

- required FPI analysis technique for simultaneous observation of upper atmospheric winds and temperatures
- Specialized analysis technique for establishing international FPI observation network
- Understanding the atmospheric physical properties in Antarctic and Arctic regions by FPI observation comparison

III. Research stuffs and scope

- Improvement of the understanding FPI observational principle
- Development the approach technique FPI raw data
- Conducting an image processing procedure for enhancement of data quality
- Extracting the final analysis product by Doppler analysis method

IV. Research results

- Image processing program for FPI raw data
- FPI raw data anlysis code
- Etalon maintenance technique for stable and continuous FPI observations

V. Application plan

- Applying developed analysis program to the different airglow observation data and studying atmospheric dynamics in different altitudes
- Inter-comparing between the FPIs and other ground-based/space-born observation data for a wide spatial coverage in upper atmospheric study

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction

- 1-1: Overview
- 1-2: Methodological view
- 1-3: Economic & Industrial view
- 1-4: Scientific view

Chapter 2. Research status

- 2-1: Overall features of FPI instrument
- 2-2: Lack of FPI raw data analysis program

Chapter 3. Research content and results

- 3-1: Developing image center determination technique in the raw data
- 3-2: Annular-summing procedure and background noise removal
- 3-3: Wind and temperature calculation based on Doppler analysis
- 3-4: Publication of Jang Bogo FPI observations results

Chapter 4. Research achievement and contribution

Chapter 5. Research application plan

- 5-1: Research background for further studies
- 5-2: Strategies for developing commercial service

Chapter 6. Scientific information from outside

Chapter 7. References

편집순서 7

목 차

제 1 장 서론

- 1-1: 연구의 필요성 (종합)
- 1-2: 기술적 측면에서의 필요성
- 1-3: 경제, 산업적 측면에서의 필요성
- 1-4: 과학적 측면에서의 필요성

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 2-1: FPI 관측 장비의 특성
- 2-2: FPI raw data 분석 프로그램 부재

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- 3-1: Raw data 상의 이미지 중심 결정 코드 제작
- 3-2: Annular-summing과 배경잡음 제거
- 3-3: 도플러 분석을 통한 바람과 온도 결정
- 3-4: 장보고과학기지 FPI 연구 논문 출판

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 5-1: 기술적 측면
- 5-2: 경제 산업적 측면

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

제 1 장 서론

제 1-1절: 연구의 필요성 (종합)

- 국내 처음 도입된 고층대기 관측 광학 장비의 분석 기술 확보가 시급함
- 관측 환경, 장비 상태 변화에 따른 능동적인 대처가 거의 불가능함
- 안정적인 관측 수행과 최적의 관측 장비 상태 유지를 위한 기술 부재
- FPI 원시자료의 접근성과 장비 유지/보수를 위한 능력 배양이 필요

제 1-2절: 기술적 측면에서의 필요성

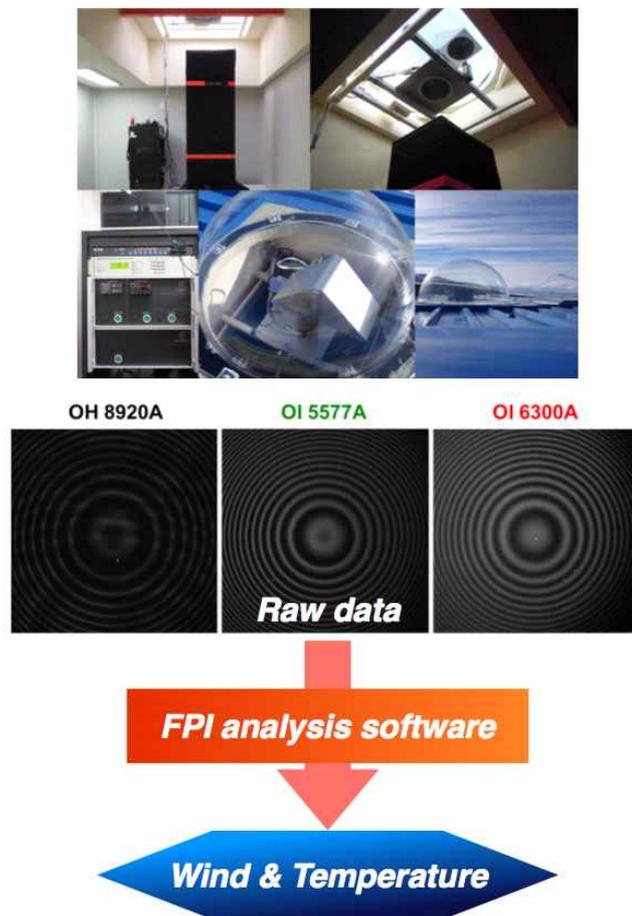


그림 2 장보고과학기지에서 운영 중인 FPI와 3개의 필터를 통해 관측된 raw data. 고층대기 바람, 온도 결정을 위한 FPI 분석 소프트웨어의 활용.

- FPI 자료 분석은 장비 제작자에 의해 개발된 소프트웨어에 이루어지며 분석 과정이 모두

비공개되어 있음

- FPI 장비가 고층대기 연구에 있어 중요한 위치에 있는 만큼 분석 기술 확보를 통해 안정적인 관측 수행과 양질의 자료 확보의 효과를 기대할 수 있음

제 1-3절: 경제, 산업적 측면에서의 필요성

- 자료 분석 기술력의 부재로 관측장비와 분석 프로그램 구매에 추가적인 예산이 소요됨
- 분석 과정의 제약은 곧 연구의 원활한 흐름에 장애로 작용하며 이를 해소하기 위한 시간과 노력이 필요함
- 자체적인 분석 프로그램 개발은 보다 직간접적으로 연구 예산 확보에 도움을 줄 수 있음

제 1-4절: 과학적 측면에서의 필요성

- FPI는 전지구적으로 설치, 운용되며 고층대기 바람과 온도를 감시하는데 매우 중요한 역할을 수행하고 있음
- 서로 다른 고도의 대기광 관측을 위하여 FPI는 2개 이상의 필터를 사용하며 이는 다른 파장의 빛을 활용하므로 적절한 분석 프로그램이 필요함
- FPI는 중성대기의 온도/바람 관측 뿐만 아니라 대기광 방출원의 종류에 따라 이온의 운동과 온도에 대한 연구가 가능하므로 능동적으로 적용 가능한 분석 프로그램이 요구됨

극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 2-1절: FPI 관측 장비의 특성

- FPI 장비는 현재까지 국내에서 개발되지 않았던 장비로 초고정밀 광학 부품을 활용한 빛의 간섭 현상에 의한 관측을 수행함
- 대기광의 종류에 따라서 그 세기가 달라지므로 광학 관측의 노출 시간을 다르게 하여 필요한 신호잡음비 (Signal-to-noise ratio)를 확보함

대기광 (파장, nm)	노출 시간 (분)	바람 오차 (ms^{-1})	고도 (km)
OH (892.0)	3	6	87
산소원자-녹색 (557.7)	3	1	97
산소원자-적색 (630.0)	5	2-6	250

표 1 남극장보고기지와 세종기지에 설치된 FPI에서 관측하는 대기광 종류와 관측 특성

제 2-2절: FPI raw data 분석 프로그램 부재

- 국내에서는 고층대기 관측에 FPI 장비의 활용 사례가 전무함
- 따라서 FPI raw data 분석 프로그램 또한 존재하지 않음
- 현재 남, 북극 주요 관측 인프라에서 고층대기 관측에 활용하기 위한 FPI 장비가 2104년부터 순차적으로 운용중
- 장비 특성과 관측 조건의 변화에 따른 자체적으로 수정 가능한 형태의 분석 프로그램이 절실히 요구됨

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 3-1절: Raw data 상의 이미지 중심 결정 코드 제작

대기 중 높은 고도에서의 방출되는 대기광을 sky-scanner를 통해 정해진 방향과 크기의 영역만을 관측하여 간섭이미지를 생성하고 대기광 파장에 맞는 초점거리를 결정하여 이미지 센서인 CCD로 입사되어 최종 raw data가 형성이 되는데, 이 때 간섭이미지는

CCD 정중앙이 아닌 위치를 기준으로 이미지가 기록되는 경우가 보통임. 따라서 정교한 이미지 상의 간섭 무늬를 활용하고 최종 산물인 바람과 온도를 결정하기 위해서는 CCD 상의 간섭이미지의 정확한 중심을 탐색하고 이로부터 이미지 프로세싱이 시작되어야 함.

2차원 간섭이미지를 CCD 센서상의 중심을 기준으로 매 10도 간격의 1차원 단면으로 분할하여 1차원 상의 대기광의 세기분포를 만들고 정규분포곡선 적합 (Gaussian curve fitting)이 가능하도록 두 개의 픽셀 구간을 경험적으로 결정함. CCD 센서에 대칭적으로 분포하는 해당 픽셀 구간에서 개별적인 정규분포곡선 적합을 수행하고 곡선 적합을 통해 얻은 곡선의 최댓값을 가지는 4개의 위치를 저장함 (그림 2). 위의 곡선 적합, 그리고 곡선의 최댓값 저장은 매 1차원 단면에서 수행하므로 하나의 raw data에서는 총 18번의 반복 작업이 이루어짐.

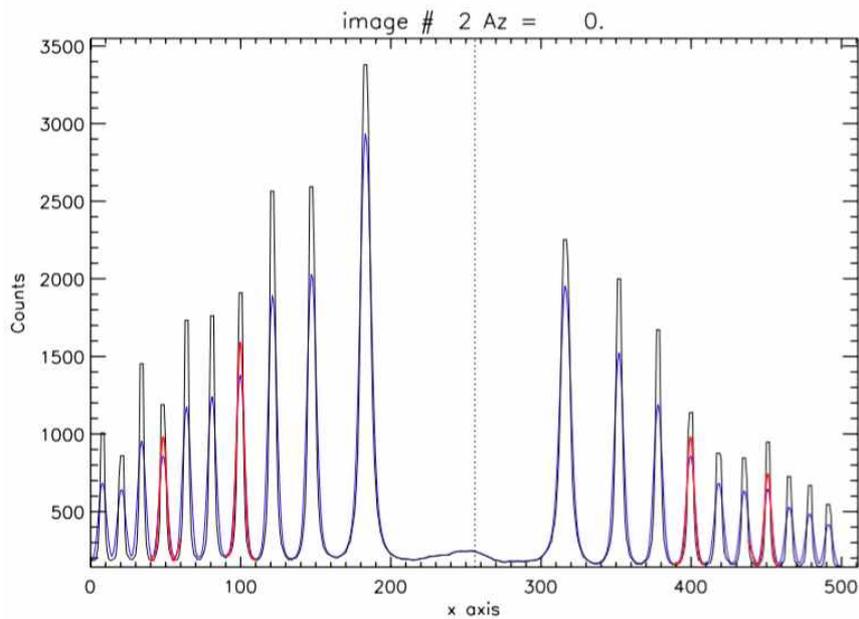


그림 3 1차원 단면상의 대기광 세기 분포. CCD 센서에서 경험적으로 결정된 곡선 적합 구간(붉은 색 곡선들이 존재하는 구간)에서 정규분포곡선 적합을 수행하고 곡선의 최댓값을 기록함.

각 이미지 단면에서 얻은 곡선 적합 데이터들을 2차원 좌표에 모두 나타내고 곡선 적합 좌표들의 중간값을 결정하여 같은 좌표상에 나타내서 이미지의 중심을 찾는 작업을 수행함. 이미지 중심이 결정되면 그 위치를 기준으로 원을 그려서 곡선 적합의 바깥쪽 점들이 원 표면에 위치하는 지 확인하여 이미지 중심의 적절하게 결정되었는지 판단함 (그림 3).

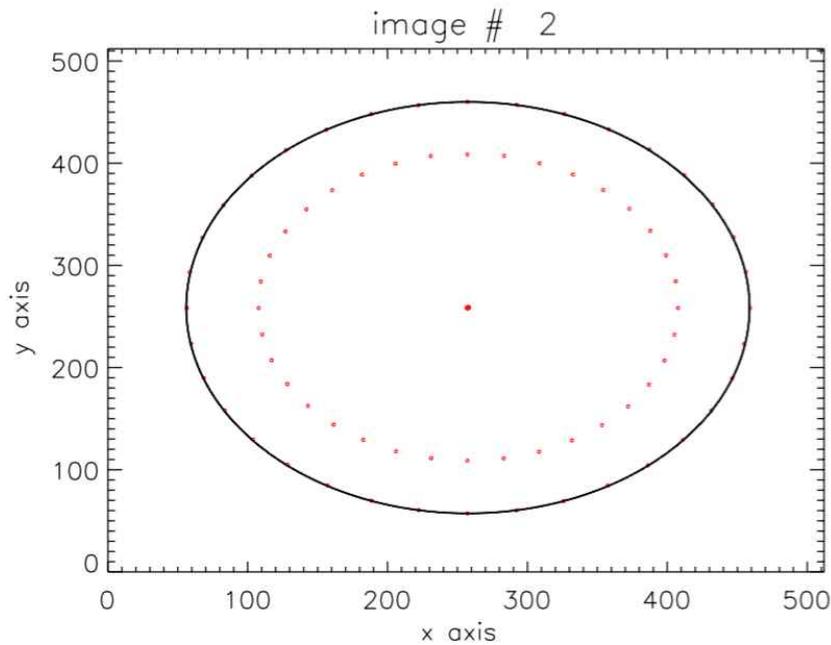


그림 4 1차원 단면에서 얻은 곡선 적합 최대값 좌표들을 2차원 이미지상에 표현 후 이미지 중심을 결정하여 정확한 결과 도출이 되었는지 검은 실선의 원을 그려서 판단.

제 3-2절: Annular-summing과 배경잡음 제거

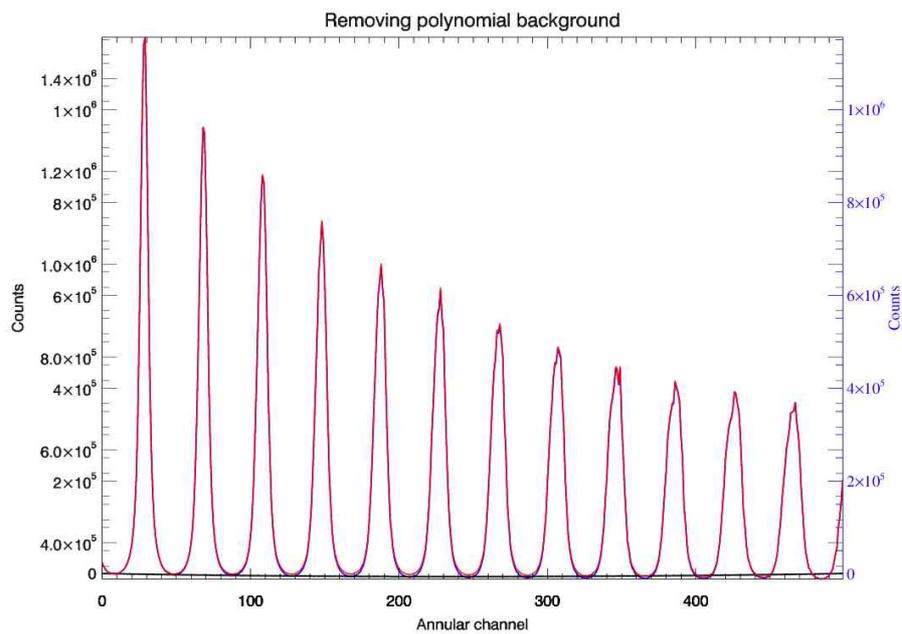


그림 5 Annular-summing을 통해 2차원 이미지를 1차원 interferogram으로 변환하고 배경잡음 값의 분포를 다항곡선 적합을 통해 제거함.

그림 3과 같이 이미지 중심 결정이 정상적으로 진행이 된 경우, 이미지 중심을 기준으로 이후 분석에 활용할 이미지의 최대 유효 반경을 결정하고 이미지 중심부터 동일한 면적을 가지는 고리를 정의한다. 동일한 면적을 가지는 조건이 유효하려면 반경이 커지면서 고리의 폭은 점차 얇아진다. 개별 고리들의 모든 픽셀 값들을 더해서 중심으로부터 고리별 더해진 값들을 1차원으로 표출한다.

CCD를 통해 기록되는 대기광의 간섭 이미지에는 광원의 불균일한 분포와 Etalon의 광학적 불완전성 등과 같은 요소들로 인해 일정하지 않은 배경잡음을 포함하고 있다. 따라서 1차원으로 변환된 이미지에 다항곡선 적합을 활용하여 배경잡음을 제거한다.

```

PRO AnnularSumImages_Setup2, Kmax,xCenter,yCenter,
xpix_size,ypix_size,pixel_width, $

        iplot,pixels_per_ring,pixel_collect_x,pixel_collect_y,pixel_coun
t, ioprint
;
; calculate radii needed for annularsumming
;
chip_half_width = xpix_size/2.
; rmax is how much of the chip radius we will carry out the annular summing,
perhaps, 0.6 cm
rmax = sqrt( chip_half_width^2. + 100.*100.)*pixel_width*0.0001
pixel_width_cm = 0.0001*pixel_width

A_zero = !pi*(rmax^2)/Kmax          ; cm^2 unit - area of innermost ring
;
pixels_per_ring = A_zero/((pixel_width_cm)^2)          ; divide area of
A0 ring by area of pixel
;
if ioprint eq 'Y'thenbegin
    print, 'area of innermost element ', A_zero
    print, 'num of pixels per ring ', pixels_per_ring
    print, 'pixel width_cm ', pixel_width_cm
    print, 'chip half width ', chip_half_width
    print, 'rmax ', rmax
    print, 'Kmax ', Kmax
endif
;
; define radii of annular rings

```

```

;
radii      = fltarr(Kmax+2)
radii(0) = 0.
floater = findgen(900)
FOR ii = 1, Kmax + 1 DO radii(ii) = sqrt( (ii * A_zero) / !pi )
;
; print,pixel_width,pixels_per_ring,ypix_size,Kmax
;
pixel_collect_x = fltarr(Kmax, pixels_per_ring + 500)
pixel_collect_y = fltarr(Kmax, pixels_per_ring + 500)
pixel_count     = fltarr(pixels_per_ring + 500)

for xpixel = 0, xpix_size-1 dobegin
;
xpart = (pixel_width_cm*(xpixel -xCenter))^2
for ypixel = 0, ypix_size-1 dobegin
;
; Determine the radius of this pixel
;
ypart =(pixel_width_cm*(ypixel -yCenter))^2
;
currentRadius = sqrt( xpart + ypart )

for ringnum = 0, Kmax-1 dobegin
if (currentRadius gt radii[ringnum]) and (currentRadius le
radii[ringnum + 1]) thenbegin
pixel_collect_x[ringnum,pixel_count(ringnum)]= xpixel
pixel_collect_y[ringnum,pixel_count(ringnum)]= ypixel
pixel_count[ringnum]= pixel_count[ringnum] + 1
endif
endifor          ; end Kmax loop
endifor          ; end xpixel loop
endifor          ; end ypixel loop

return
end

PRO AnnularSumImages2, Kmax,
pixels_per_ring,pixel_collect_x,pixel_collect_y, pixel_count, $

```

```

                                laserImage, x_array,annularSumLaser, iplot
;
; carry out the operation of annular summing
;
annularSumLaser      = fltarr(3*Kmax)
x_array              = findgen(3*Kmax)
;
; Annular summing loop
;
    AnnularSumSave2D  = fltarr(pixels_per_ring+ 500, Kmax)
    annularSumPlot    = fltarr(pixels_per_ring + 500)
    annularSumPlotOrig = fltarr(pixels_per_ring+ 500)
    annularSumOrig    = fltarr(pixels_per_ring + 500)
;

for ringnum = 0, Kmax -1dobegin
    ring_pix = 0
    for ring_collect = 0, pixel_count[ringnum]-1dobegin
        xpix =pixel_collect_x[ringnum, ring_collect]
        ypix =pixel_collect_y[ringnum, ring_collect]
        pixel_content =laserImage[xpix,ypix]
        annularSumSave2D[ring_pix,ringnum] = pixel_content
        annularSumOrig[ringnum]
annularSumOrig[ringnum] + pixel_content
        ring_pix =ring_pix + 1
    endfor
    endfor      ; end of ringnum loop

    annularSumSaveOrig2D= annularSumSave2D

for ringnum = 0, Kmax-1dobegin

    annularSumPlotOrig[0:pixel_count[ringnum] - 1] =
annularSumSaveOrig2D[0:pixel_count(ringnum) - 1,ringnum]
    annularSumPlot[0:pixel_count(ringnum) - 1]
=    annularSumSave2D[0:pixel_count(ringnum)- 1, ringnum]

```

```

pro Background_fit_polynom2, annularSum,Kmax,startch,K_pts,n_fringe

xarray = findgen(Kmax)
annularSum_mod = ftarr(Kmax)

;fit polynomial order 3 to beginning and end points of annular sum, and
minima of 5 equally-spaced segments inbetween
ini=startch
ind_var = [ini]
dep_var = annularSum[ini]
for i=0, n_fringe-1 dobegin
    ;istart=ini+K_pts*i
    iend=ini+K_pts*(i+1)
    if iend gt kmax-1 then iend=kmax-1
    new_min=annularSum[iend];min(annularSum[istart:iend-1],imin_pts)
    ind_var=[ind_var,iend];imin_pts+istart]
    dep_var=[dep_var,new_min]
endfor
; ind_var=[ind_var,kmax-1]
; dep_var=[dep_var,annularSum[kmax-1]]
; stop
norder=3
num=norder+1
xvector=ind_var
yvector=dep_var
if n_elements(xvector) lt num thenbegin
    while n_elements(xvector) lt num dobegin
        if xvector[0]-K_pts gt 0 thenbegin
            yvector=[annularSum[xvector[0]-K_pts],yvector]
            xvector=[xvector[0]-K_pts,xvector]
        endif elsebegin
            if xvector[-1]+K_pts gt kmax-1 thenbegin
                yvector=[yvector,mean(yvector)]
                xvector=[xvector,xvector[-1]+K_pts]
            endif elsebegin
                yvector=[yvector,annularSum[xvector[-1]+K_pts]]
                xvector=[xvector,xvector[-1]+K_pts]
            endelse
        endelse
    endwhile
endwhile

```

```

    endelse
    endwhile
endif

ind_var=xvector
dep_var=yvector

poly_coefs = poly_fit(xvector, yvector, norder./double,status=estatus)
xarray = findgen(kmax)
back_array=fltarr(kmax)
for i=0,size(poly_coefs,/n_elements)-1dobegin
    back_array=back_array+poly_coefs[i]*(xarray ^ i)
endfor
annularSum_mod(0:Kmax-1) = annularSum(0:Kmax-1) - back_array(0:Kmax-1)

```

제 3-3절: 도플러 분석을 통한 바람과 온도 결정

1차원 스펙트럼 분포는 Calibration laser를 이용해서 얻은 스펙트럼과 비교하여 도플러 분석에 활용할 도플러 이동과 확산값을 추정한다. 도플러 이동은 대기광을 방출하는 산소 원자가 주변의 바람에 의해 운동하면서 발생하는 파장의 변화를 나타내는 양이며, 도플러 확산은 대기광 방출원인 산소 원자의 무작위 운동으로 인한 스펙트럼 상의 분산값으로 원자들의 운동에너지에 비례하는 양이다.

$$w_T = \lambda_0 \sqrt{\frac{2kT}{mc^2}}$$

도플러 이동을 이용해 얻은 속도는 시선 방향에서의 속도 이므로 수평 방향의 바람을 얻기 위해서는 시선 방향의 성분을 수평 방향으로 투영하는 과정이 필요하다. FPI의 고도가 45도 이므로 시선 방향 성분의 수평 방향으로 변환에 필요한 비례 상수는 $\sqrt{2}=1.414$ 이다.

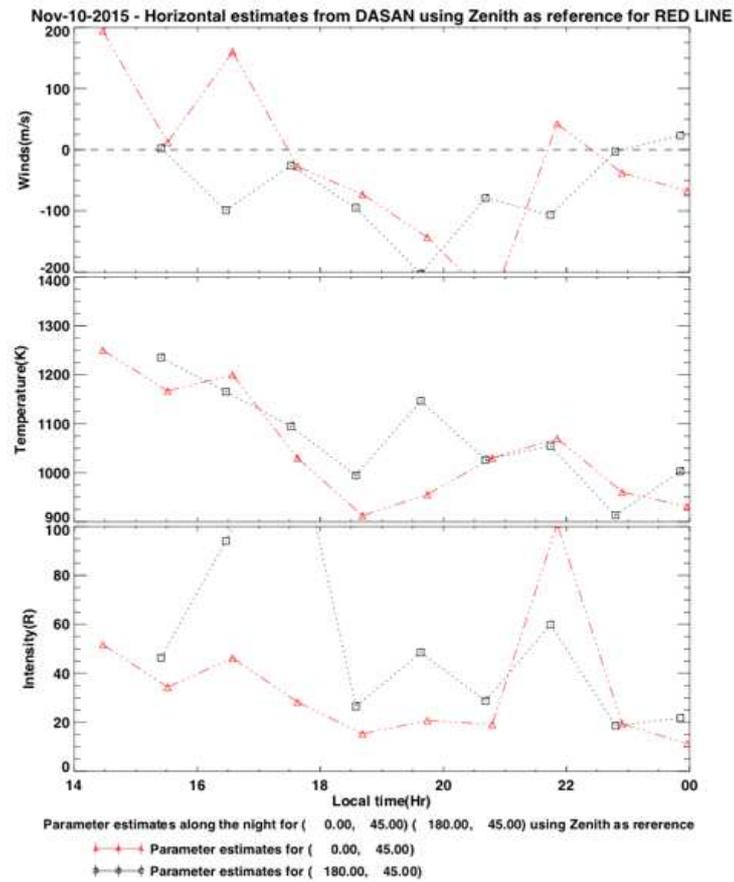


그림 6 630.0 nm 대기광으로부터 얻은 남북 방향 (meridional) 바람 (위), 온도 (중간), 대기광 세기 (아래). sky-scanner에 의해 고도각, 방위각에 따라서 4방위에서의 바람과 온도를 모두 얻을 수 있음.

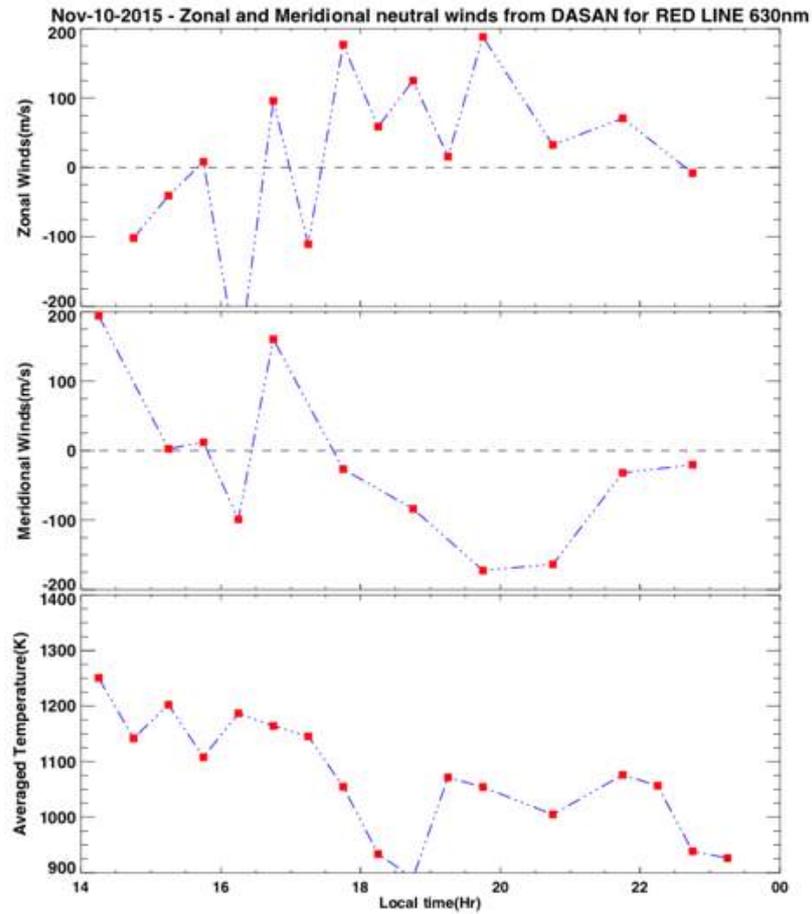


그림 7 2015년 11월 20일 야간 시간 동안 관측된 630.0 nm 동서 방향 (zonal), 남북 방향 (meridional) 바람과 온도.

제 3-4절: 장보고과학기지 FPI 연구 논문 출판

본 과제의 주요 연구 수행과 병행하여 장보고과학기지에서 2014년부터 중간권/열권 바람과 온도 관측을 수행해온 FPI 자료를 활용한 연구 논문을 Journal of Geophysical Research - Space Physics 에 출판하였다. 해당 논문은 장보고기지 상공에서의 중성 대기 바람의 지역 시간에 따른 변화, 계절 변화 특성을 확인하고 2015년 3월 17일 지자기 폭풍이 발생하였을 때의 열권 중성 바람과 온도의 변화를 TIEGCM 모델과 비교하고 모델이 관측과 차이가 나는 이유에 대해 기술하였다.

RESEARCH ARTICLE

10.1002/2017JA024408

Key Points:

- New FPI observation for the polar upper atmospheric winds and temperature is initiated at Korean Antarctic station in 2014
- HWM14 and TIEGCM are evaluated for polar cap region by comparing FPI wind measurements
- The effects of intense geomagnetic storm on 17 March 2015 on thermospheric wind and temperature are investigated in the polar cap region

Correspondence to:

G. Jee,
gjee@kopri.re.kr

Citation:

Lee, C., Jee, G., Wu, Q., Shim, J. S., Murphy, D., Song, I.-S., ... Kim, Y. H. (2017). Polar thermospheric winds and temperature observed by Fabry-Perot interferometer at Jang Bogo Station, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 9685–9695. <https://doi.org/10.1002/2017JA024408>

Polar Thermospheric Winds and Temperature Observed by Fabry-Perot Interferometer at Jang Bogo Station, Antarctica

Changsup Lee¹, Geonhwa Jee¹, Qian Wu², Ja Soon Shim³, Damian Murphy⁴, In-Sun Song¹, Hyuck-Jin Kwon¹, Jeong-Han Kim¹, and Yong Ha Kim⁵

¹Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea, ²High Altitude Observatory, NCAR, Boulder, CO, USA, ³CUA/NASA GSFC, Greenbelt, MD, USA, ⁴Australian Antarctic Division, Kingston, Tasmania, Australia, ⁵Department of Astronomy, Space Science and Geology, Chungnam National University, Daejeon, South Korea

Abstract Upper atmospheric neutral winds and temperature have been observed by the Fabry-Perot interferometer (FPI) which was installed at Jang Bogo Station (JBS), Antarctica, in 2014. Since JBS is mostly located within the polar cap region, the observed thermospheric winds at 250 km show strong diurnal variations with notable antisunward motions due to the effects of plasma convection. The winds at 87 km, on the other hand, show semidiurnal variations due to the lower atmospheric tidal effects. We found that the winds from green line emission show largely diurnal variations, unlike the other independent observations, which might be due to the auroral contamination. The horizontal wind model 2014 winds at 250 km show reasonable agreement with FPI winds, while large discrepancies exist at 87 km in terms of seasonal variations. There is a distinctive asymmetric seasonal variation of the thermospheric zonal wind in the dusk and dawn sectors. FPI temperatures at 250 km show a fairly close correlation with K_p index, especially in 2015 when the geomagnetic activity is stronger. However, the temperatures at 87 km are mostly independent on K_p index. Finally, during the intense geomagnetic storm, thermospheric winds and temperature are significantly disturbed and Thermosphere Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model simulations are in surprisingly good agreement with observation for winds but the temperatures are significantly underestimated during the whole storm period.

그림 8 장보고기지 FPI 관측 결과를 활용한 중성대기 바람과 온도 특성을 연구한 논문. American Geophysical Union – Journal of Geophysical Research 저널에 2017년 9월 27일 출판.

남극장보고과학기지는 쌍극자 형태의 지구 자기장 구조를 기반으로 한 지자기 좌표계 상의 극관 (Polar cap) 지역에 위치해 있어, 우주에서 유입되는 플라즈마, 그리고 자기권에서의 전자기적 현상인 전류의 전리권 mapping 에 의해 발생하는 플라즈마 대류에 의한 영향으로 중성대기의 운동과 온도 등이 크게 영향을 받는 지역이다. 따라서 FPI로 관측된 바람은 극관 지역에서의 플라즈마 대류에 의해 항상 태양 반대 방향으로 향하고 있으며 상대적으로 고도가 낮은 중간권 상부의 경우에는 자기권-전리권의 영향보다 저층에서 전파되는 대기 파동 (조석파, 대기 중력파 등) 에 의해 대기의 동역학적인 특성이 결정된다.

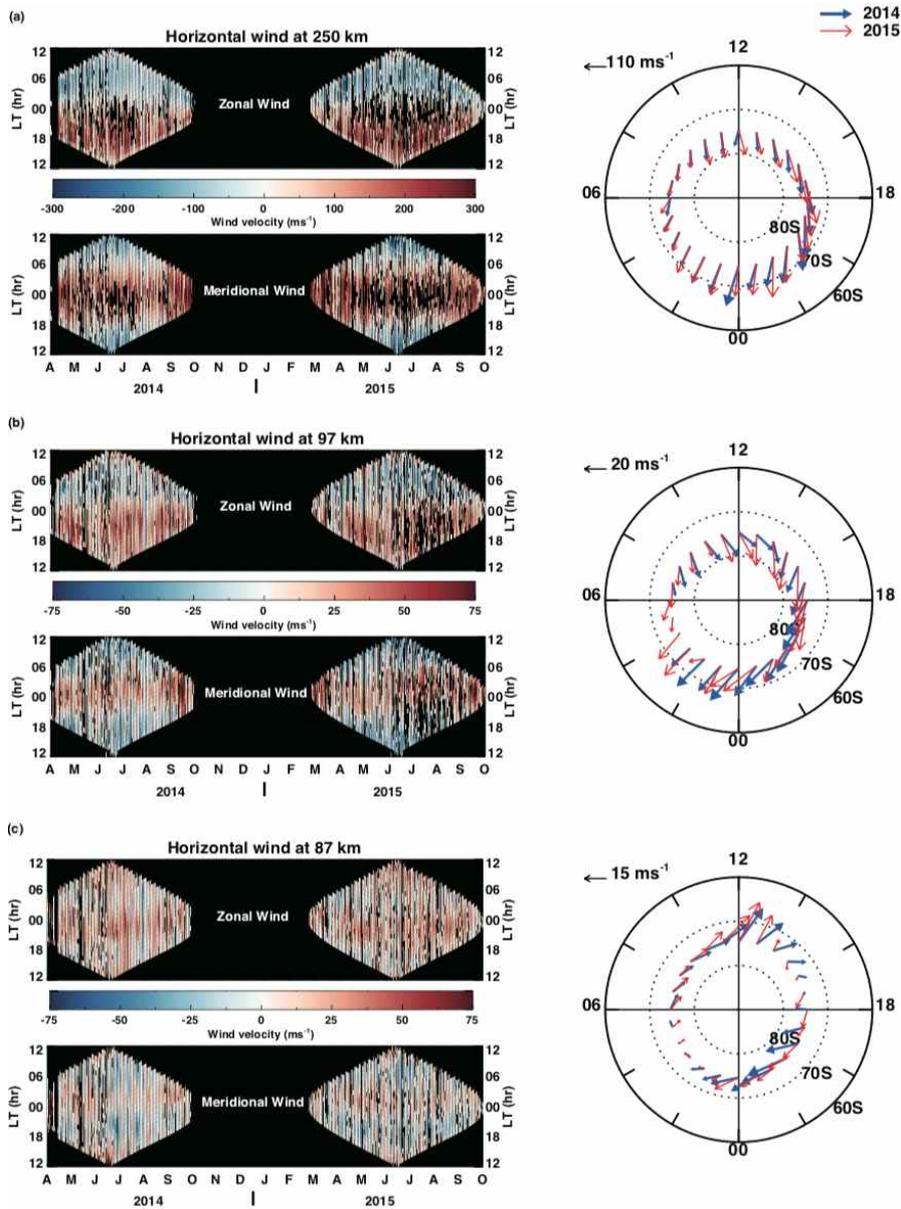


그림 9 장보고기지 FPI 로 관측된 중성 바람의 지역 시간에 따른 변화 (왼쪽. 250 km 고도 (위), 97 km 고도 (중간), 87 km 고도 (아래)). 바람장의 지역 시간에 따른 변화를 남극점을 중심으로 시계방향을 동쪽, 바깥 방향을 북쪽으로 정의하여 표현함.

격렬한 태양 폭발 (플레어, 코로나 질량 분출) 에 의해 대량의 고에너지 입자들이 매우 높은 속도로 지구를 향해 날아와 지구 자기장과 상호작용을 해서 태양 방향의 지구 자기장이 압축되고, 자기장 재결합에 의해 우주로 열린 자기장을 따라 유입되는 고에너지 플라즈마로 인해 극지역 고층대기는 막대한 에너지와 입자들로 인해 격렬한 동역학적, 열

역학적 변화를 경험한다. 지난 2015년 3월 17일에 있었던 지자기폭풍은 지자기활동 지수인 Kp 지수가 8까지 오르는 매우 강력한 지자기폭풍으로 기록되고 있으며 장보고기지 FPI 관측에서도 눈에 띄는 열권 바람 변화와 온도 상승이 확인되었다.

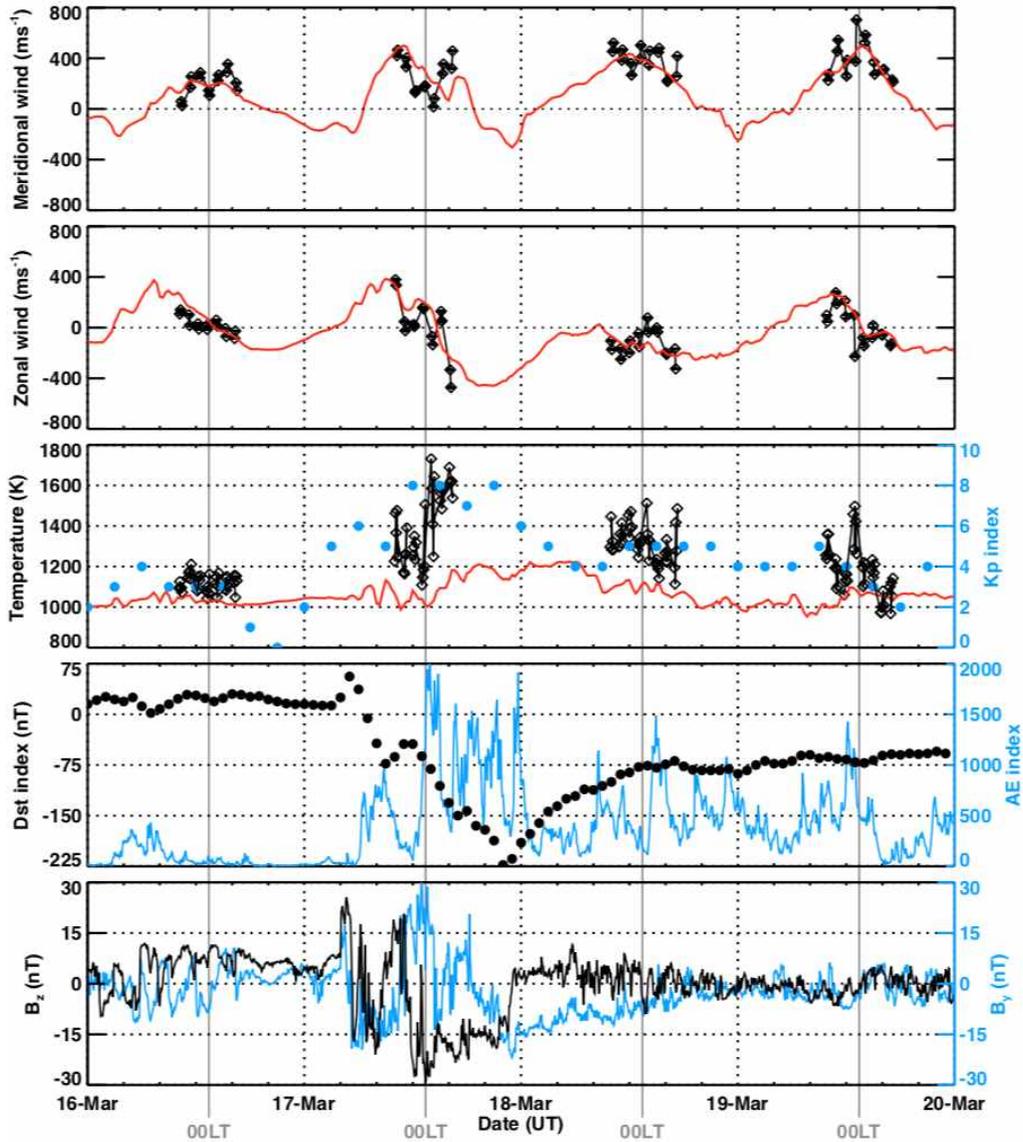


그림 10 2015년 3월 17일 발생한 강력한 지자기폭풍 발생 시 장보고기지 FPI로 관측된 열권 바람과 온도 변화. 아래 두 그림은 지자기폭풍 때의 우주환경 지수들 (AE 지수, Dst 지수, 행성간 자기장의 크기)을 나타낸다. 붉은 색 실선은 FPI 관측 자료와 비교하기 위해 사용된 TIEGCM 모델 결과.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

연구목표	연구내용	달성도	대외기여도
고위도 열권 바람, 온도 감시를 위한 FPI 분석 기술 개발	FPI 관측 자료 정밀 분석 기술 개발	100%	- 고층대기 연구를 위한 FPI 활용도의 비약적인 확장 - FPI 관련 연구 기관과의 자료 비교
	장보고 과학기 지 FPI 관측 결과 논문 출판	100%	- 국제 저명 학술지 (JGR-Space Physics)에 장보고기지 연구 결과 소개를 통한 활발한 연구 교류 가능

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 5-1절: 기술적 측면

- FPI 원시자료 분석 기술을 활용하여 다른 파장대의 대기광을 관측하는 FPI 자료에 수정, 확장하여 보다 넓은 영역에서의 대기 물리량을 연구하리라 기대함
- 이미지 처리의 관점에서 다른 광학 관측 자료에 부분적인 적용을 통해 기존 연구를 보완할 수 있는 가능성을 확보함
- Etalon 정렬 기술은 안정적인 장비 운영과 양질의 관측 자료 확보에 활용 가능함
- FPI 분석 결과는 타 연구 기관의 분석 자료와 비교, 검증을 통해 앞으로 지속적인 자료 질 향상을 기대할 수 있음

제 5-2절: 경제, 산업적 측면

- FPI 분석 기술 보유는 연구에 집중할 수 있는 기회를 제공함으로써 자료 분석을 위한 시간과 예산을 절감할 수 있음
- FPI 분석 기술 확보를 통해 국내 연구 장비 관련 업체의 FPI 개발에 대한 관심을 높여 연구 장비의 국내 개발과 제작을 위한 초석을 다질 수 있는 기회를 마련

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- FPI 자료 분석 프로그램의 토대가 되는 코드는 University of Clemson 과 University of Illinois 에 의해 제공되었으며 광학 이미지의 전처리와 분석의 기본 과정들을 담은 소프트웨어를 수집함
- FPI 광학 장비의 지속적인 개발을 통해 시야가 넓은 전천 FPI 가 University of Fairbanks

- 연구팀에 의해 개발되어 1회 관측을 통해 2차원 바람장을 얻을 수 있는 기회가 마련됨
- 미국 여러 연구 기관에서 FPI 관측 네트워크를 구성한 연구 결과가 소개되어 국지적인 고층대기 연구가 아닌 중규모, 또는 범지구 규모에서의 고층대기 바람과 온도 특성, 그리고 이들의 시공간적인 진화에 대한 연구가 가능해짐

제 7 장 참고문헌

Coakley, M. M., Roesler, F. L., Reynolds, R. J. and Nossal, S.: Fabry-Perot CCD annular-summing spectroscopy: Study and implementation for aeronomy applications, *Appl. Opt.*, 35(33), 6479-6493, 1996.

Lee, C., Jee, G., Wu, Q., Shim, J. S., Murphy, D., Song, I.-S., Kwon, H.-J., Kim, J.-H. and Kim, Y. H.: Polar Thermospheric Winds and Temperature Observed by Fabry-Perot Interferometer at Jang Bogo Station, Antarctica, *J Geophys Res-Space*, 122(9), 9685-9695, doi:10.1002/2017ja024408, 2017.

Makela, J. J., Meriwether, J. W., Huang, Y. and Sherwood, P. J.: Simulation and analysis of a multi-order imaging Fabry-Perot interferometer for the study of thermospheric winds and temperatures, *Appl. Opt.*, 50(2), 4403-4416, doi:10.1364/AO.50.004403, 2011.

Wu, Q., Gablehouse, R. D., Solomon, S. C., Killeen, T. L. and She, C.-Y.: A new Fabry-Perot interferometer for upper atmosphere research, vol. 5660, edited by C. A. Nardell, P. G. Lucey, J.-H. Yee, and J. B. Garvin, pp. 218-227, SPIE. 2004.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

