

Comparison between wind blocking fields and propagating directions of mesospheric gravity waves observed from all-sky imagers over King Sejong Station, Antarctica

Hosik Kam^{1,2}, Yong Ha Kim¹, Jeong-Han Kim², In-Sun Song², Byeong-Gwon Song², Takuji Nakamura^{3,4}, Masaki Tsutsumi^{3,4}, Yoshihiro Tomikawa^{3,4}, Yoshihiro Tomikawa^{3,4}, Mitsumu Ejiri^{3,4}, Masaru Kogure³, Septi Perwitasari³

- ¹ Department of Astronomy, Space, and Geology, Chungnam National University, Daejeon, South Korea
- ² Division of Polar Climate Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea
- ³ National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan
- ⁴ Department of Polar Science, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), Tokyo, Japan

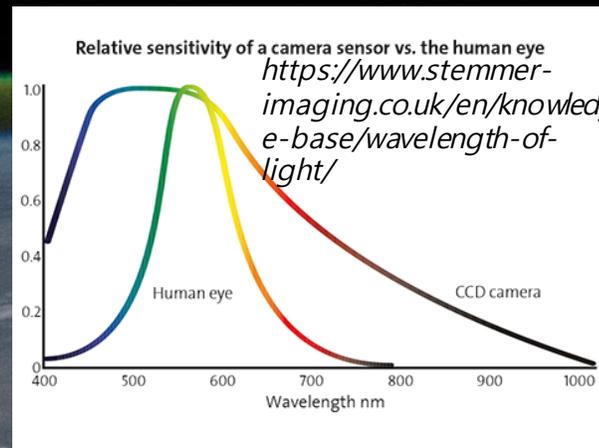
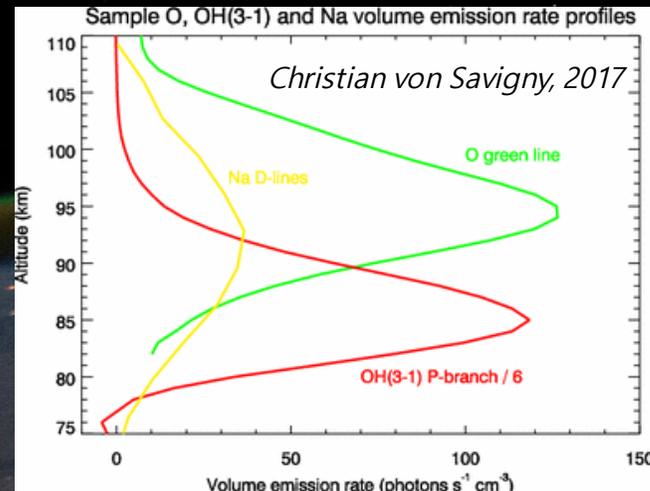
대기중량파 & 대기광

산악성 지형, 제트, 강한 대류 ...

대기중량파(Atmospheric Gravity Wave; GW)란, 부력의 영향 아래서 밀도의 차이로 층리된 유체 안에서 복원력인 중력과 부력으로 인해 발생하는 대기 파동.

- 연직 전파성을 가져 성층권, 중간권까지 전파: 운동량 및 에너지 수송
- 전지구적인 중간권 대규모 순환에 중요한 역할 (Fritts and Vincent, 1987).

대기광(Airglow)이란, 대기를 구성하는 원자, 분자에서 복사천이로 방출하는 희미한 빛 → 주로 야간관측



OH, OI, Na 대기광 체적 방출률 프로파일 대기광은 가시광 영역으로 CCD로 관측할 수 있다.

대기광 전천 카메라(2-D)로 관측한 대기중량파의 형상

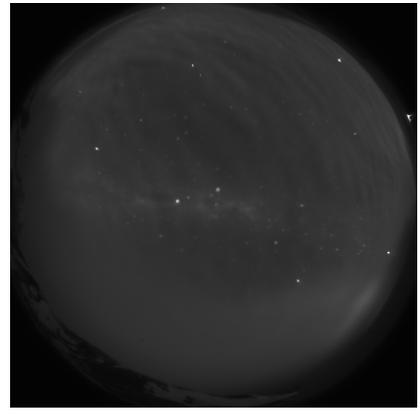
관측

세종기지 전천 카메라 (All-Sky Camera; ASC)

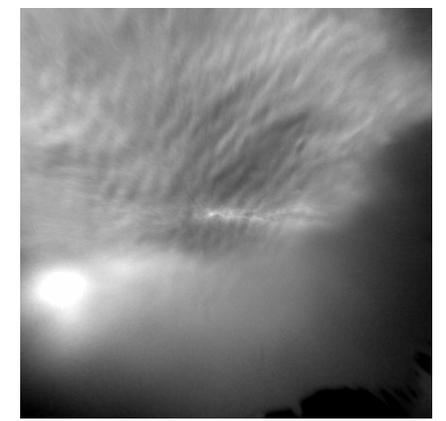
- ✓ 2008년 5월부터 운용 중.
- ✓ 서로 다른 고도를 관측하기 위해 다중 파장대역 필터 휠(multifilter wheel)

대기광 종류	파장대역 (nm)	노출시간 (sec)
OH Meinel	720.0 – 820.0	20
OI 5577	557.7	150
OI 6300	630.0	150

어안 렌즈를 장착한 (180° FOV) ASC → 이미지 왜곡



지리학적 좌표로 변환



Correction Lens
Photometric CCD

세종기지 유성레이다 (Meteor Radar; MR)

- ✓ 2007년 3월부터 운용 중.
- ✓ 12 kW 송출 / 33 MHz 주파수.
- ✓ 전파 송출 → 플라스마로 구성된 유성흔(meteor trail)으로 부터 후방산란 → 전파 수신.
- ✓ 하루 동안 관측되는 유성 에코의 수: 12000 – 40000.
- ✓ 유성에코의 시선속도(radial velocity)로부터 80-100 km까지의 수평 바람 추정.

MERRA2 재분석 자료

(Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications; MERRA2)

- ✓ 전지구적 대기 재분석 자료.
- ✓ NASA Global Modeling and Assimilation Office로부터 제공.
- ✓ 0 – 64 km 영역의 수평 바람 제공.

ASC 관측



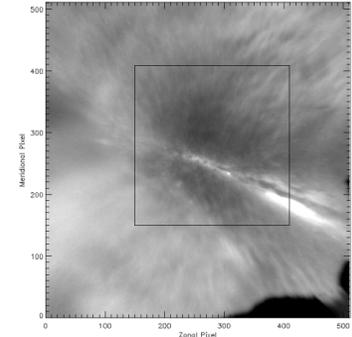
✓ 세종기지 ASC 관측 기간: 2008년부터 매 해 2월 ~ 10월

운용 날 수	
2008	92
2009	33
2010	146
2011	171
2012	216
2013	195
2014	210
2015	197
2016	187
2017	X
2018	분석 미실시
2019	운용 중
Total	1,455 +

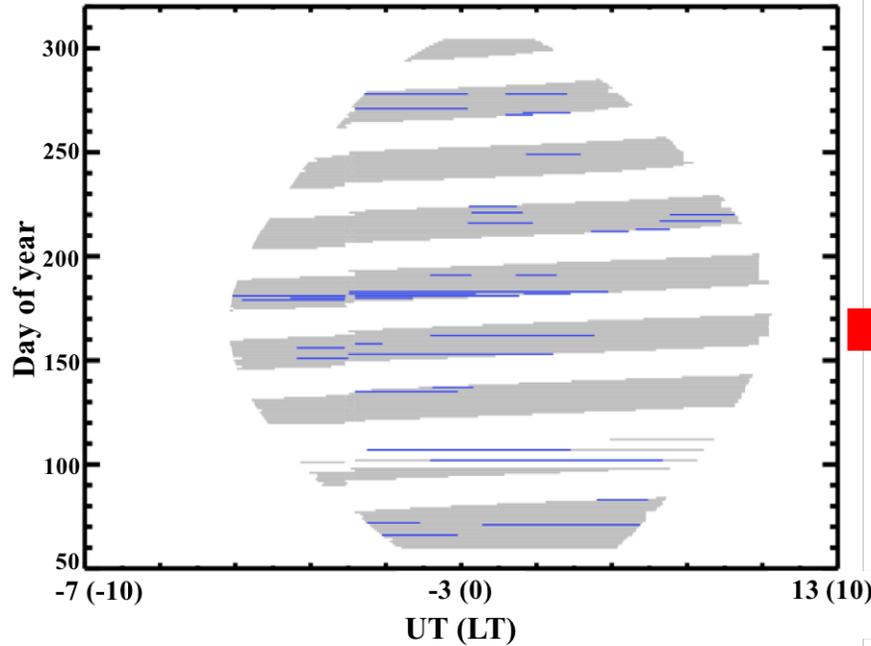
- ❖ 광학 장비이기 때문에 날씨는 관측 이미지에 큰 영향
- ❖ 맑은날의 이미지 선별 → 육안으로 확인.

◆ 기준

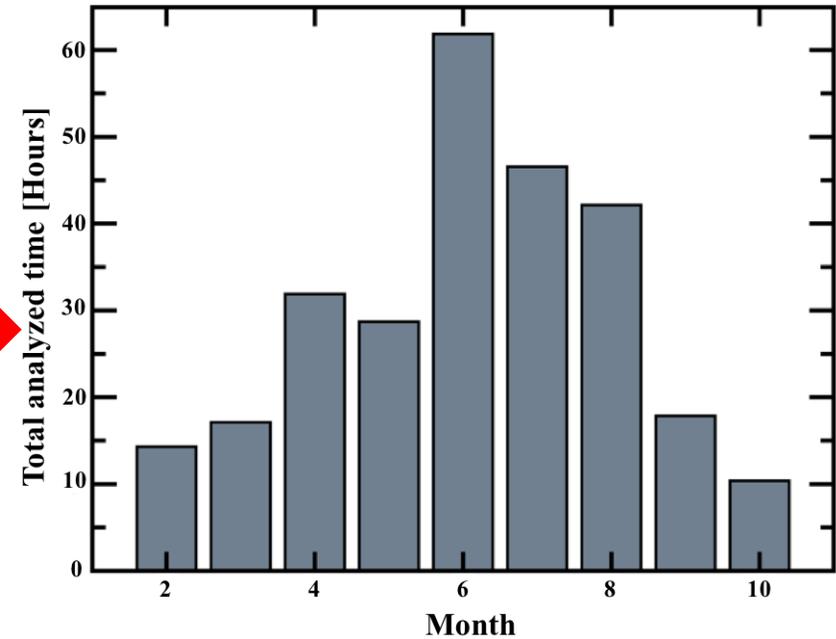
- ① 구름이 없는 관측 이미지의 지속 시간: 1시간 이상
- ② 구름이 없는 관측 이미지의 영역: 100 pix x 100 pix (~100 km x 100 km) 이상



KSS ASC observation [2013]



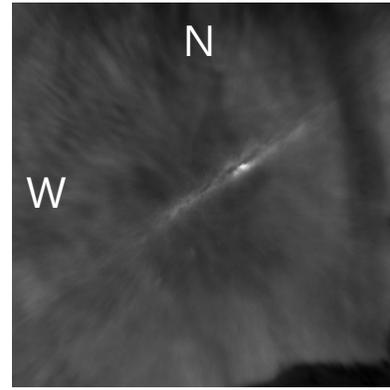
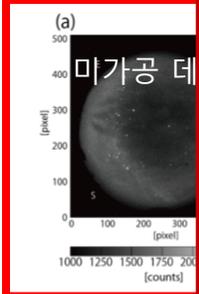
KSS ASC total analysis time [2012-2016]



운용 날 수	맑은 날 수	분석 가능 윈도우
195	29	31

총 분석 가능 윈도우
107

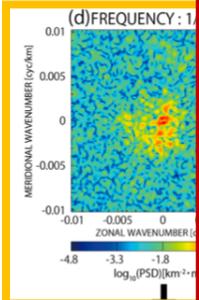
시간 연속적인 대기광 이미지 자료



$$I' / I_0 (= \rho' / \rho_0)$$

$$\text{입력 데이터: } \frac{I'}{I_0} = \frac{I - \bar{I}}{\bar{I}}$$

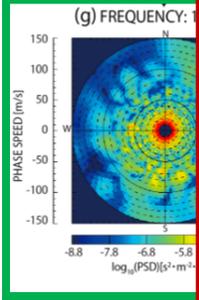
\bar{I} : 시간 연속적 이미지 자료의 픽셀 당 평균 값



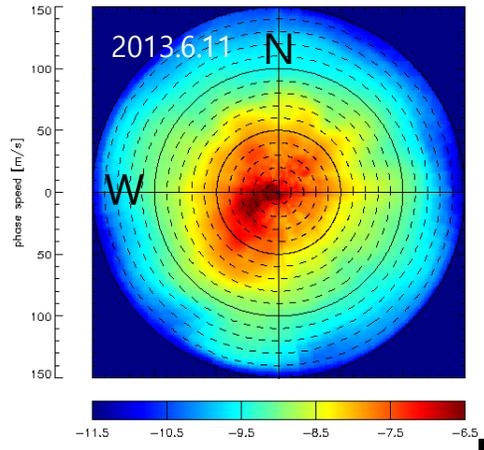
M-transform

3D-FFT
수평 파장 범위: 10-100 km

2차원 수평 위상 속도 도메인의 파워 스펙트럼 밀도 분포 (Power Spectrum Density distribution; PSD)



- GW 속성
- 전파 방향
 - 수평 위상 속도
 - 파워



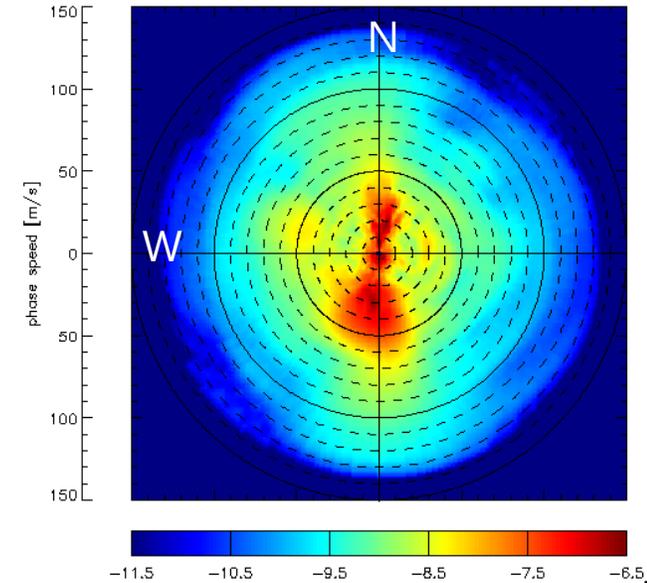
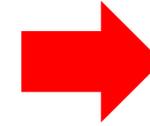
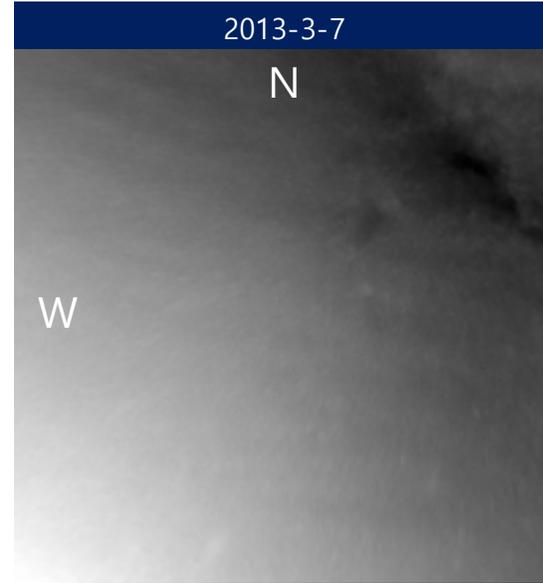
3

14

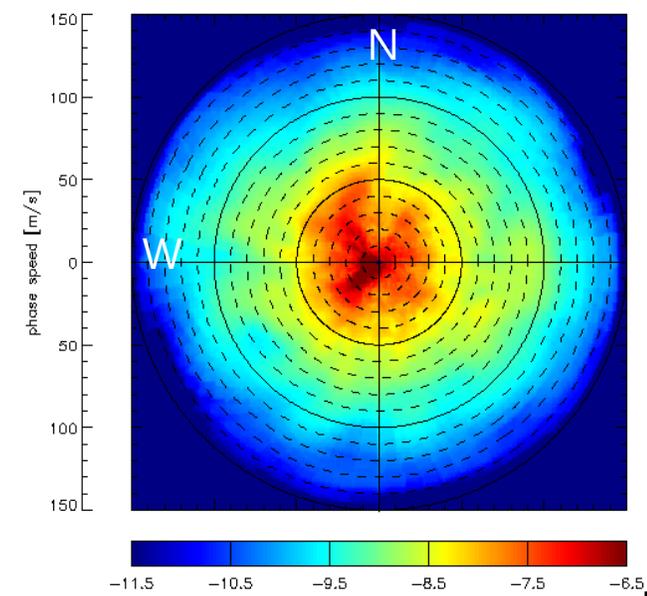
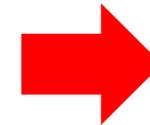
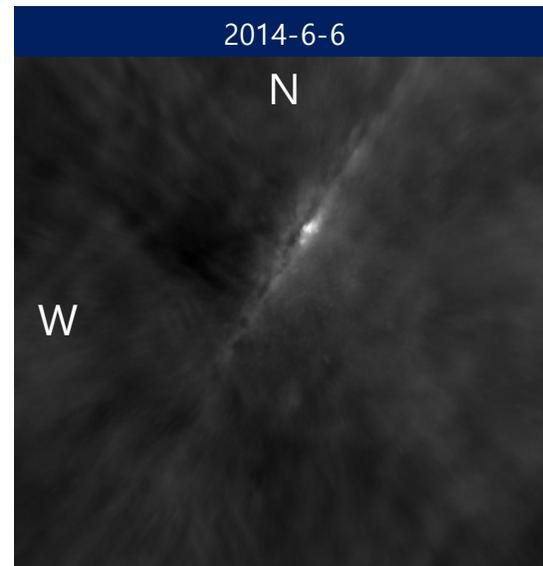
\bar{I}^2

세종기지에서 관측된 GW의 계절적 특성

가을 & 봄
 → 단색파 구조
 (Quasi-monochromatic structures)



겨울
 → 복합 구조
 (Complex structures)

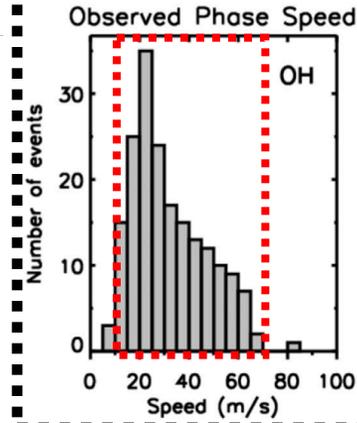
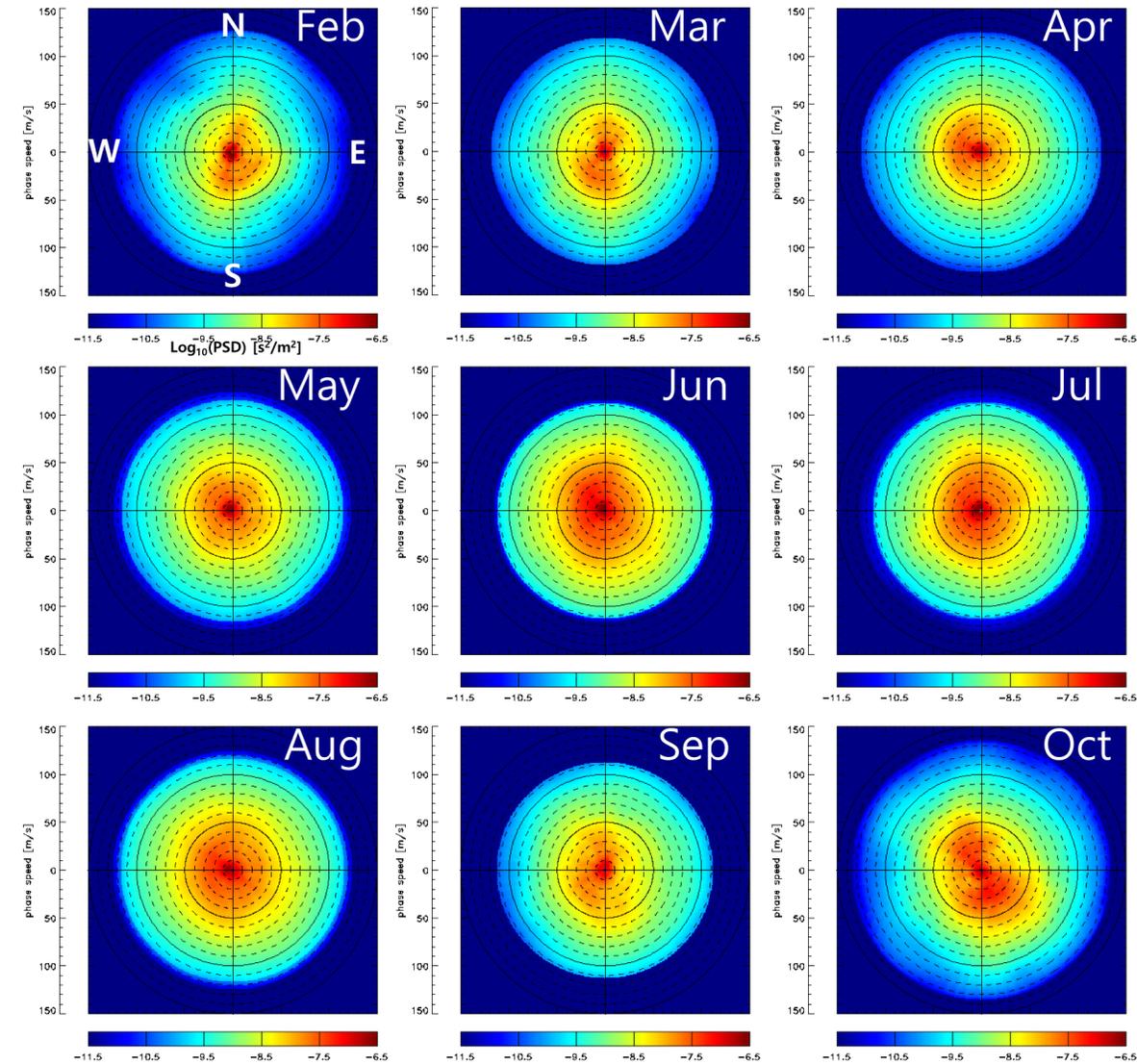


평균 PSD로 계절적 패턴 분석



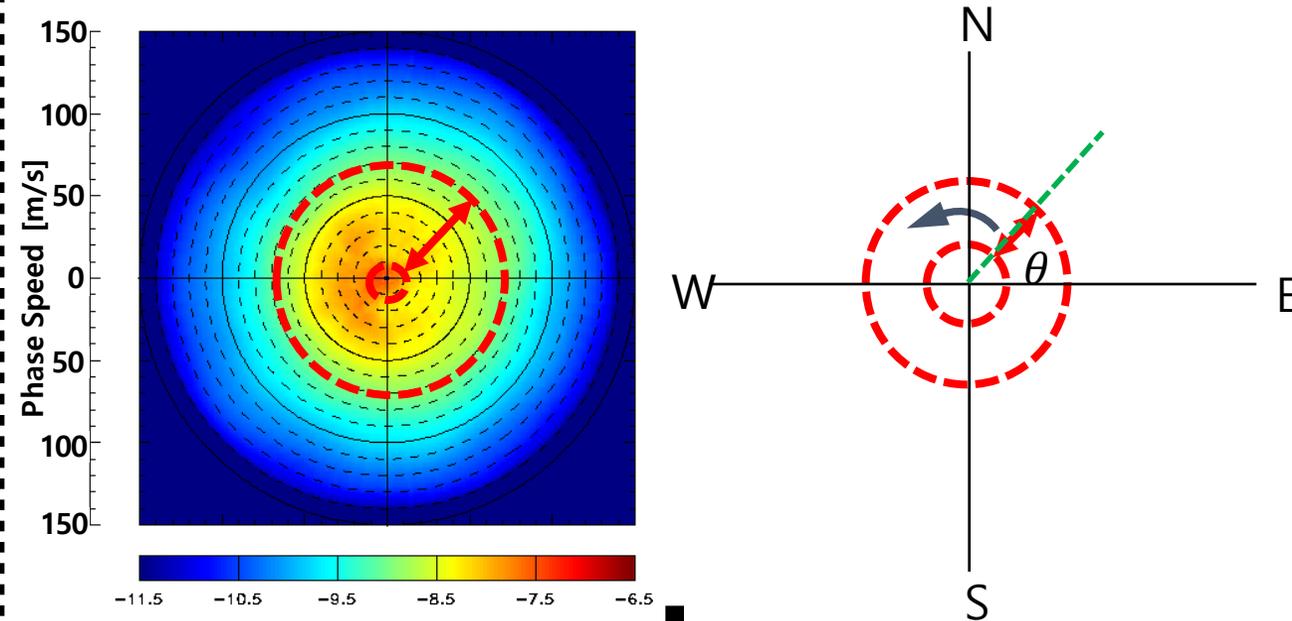
1. 2012-2016 월 평균 PSD 계산

Monthly Mean OH PSD



GW의 우세한 수평 위상 속도 범위 선택
 → 10m/s ~ 70 m/s : 분포의 99.5%
 (최빈 범위: 20-25 m/s) *Kam et al., 2017*

2. 방위각 1°당 수평 위상속도가 10-70m/s인 PSD를 평균

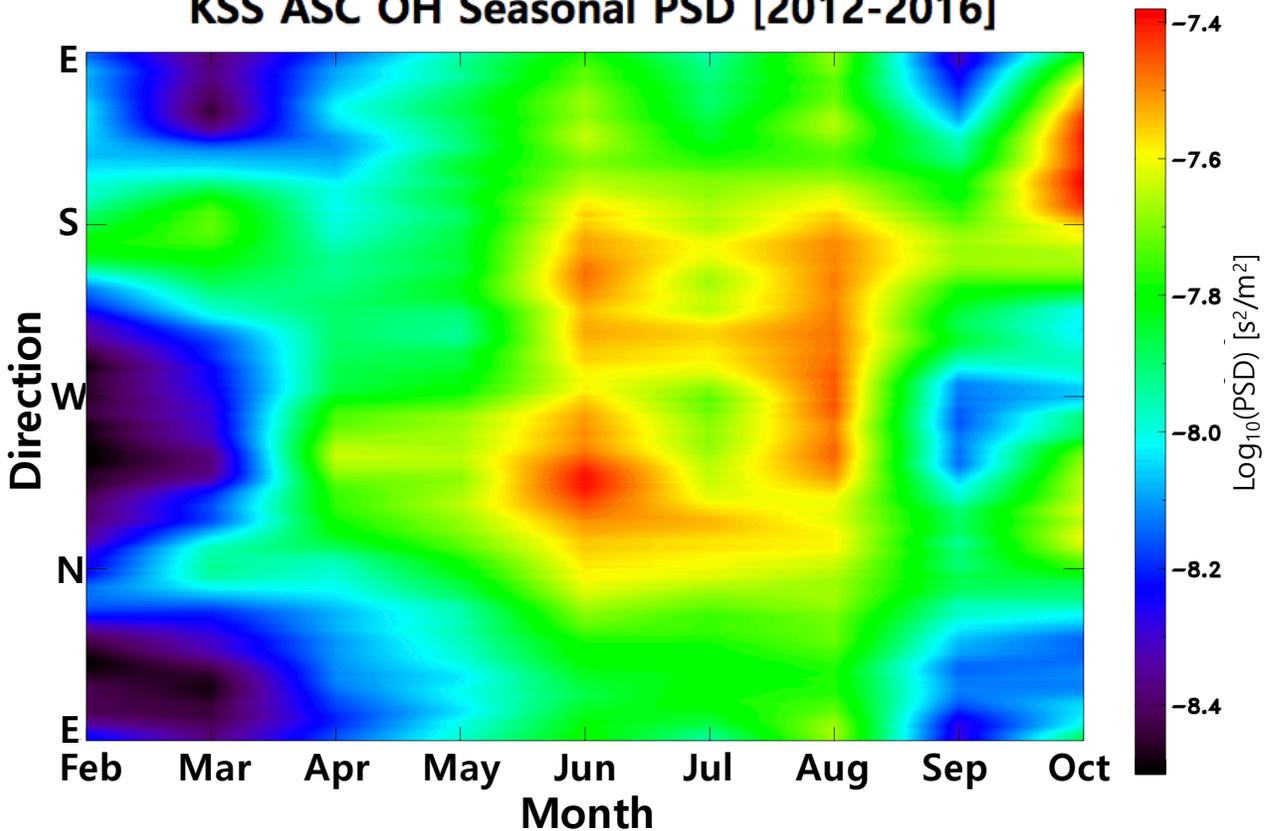




평균 PSD로 계절적 패턴 분석

3. 방위각에 따른 PSD 평균값 시계열

KSS ASC OH Seasonal PSD [2012-2016]



우세한 전파 방향

가을: 남향 전파
겨울: 서향 전파
봄: 남동향 전파

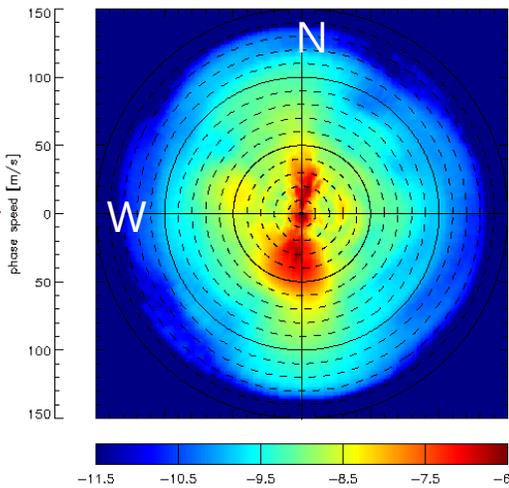
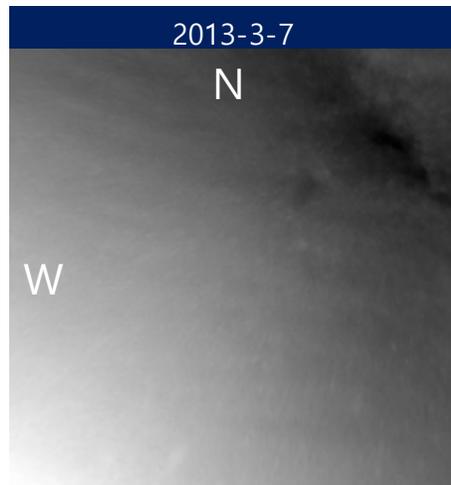
파동 활동성
(파워 & 전파 분포)

가을 < 봄 < 겨울

가을 & 봄

→ 단색파 구조

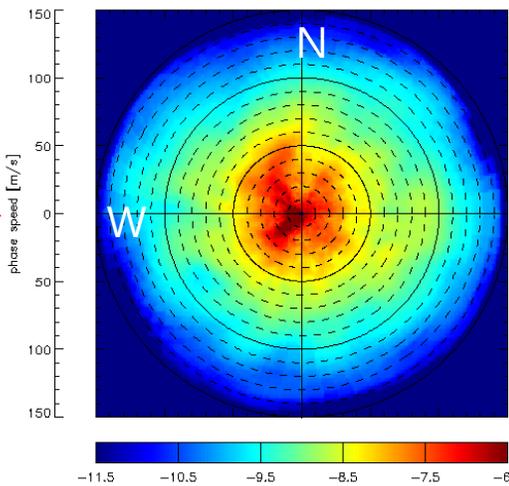
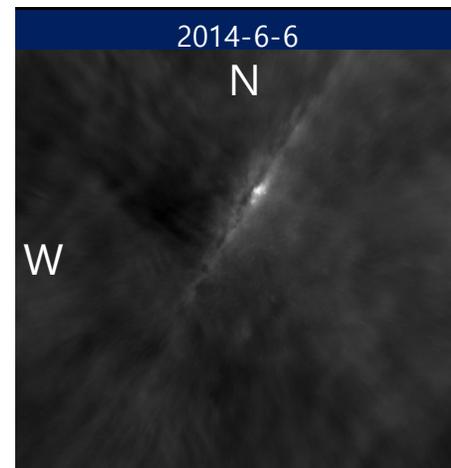
(Quasi-monochromatic structures)



겨울

→ 복합 구조

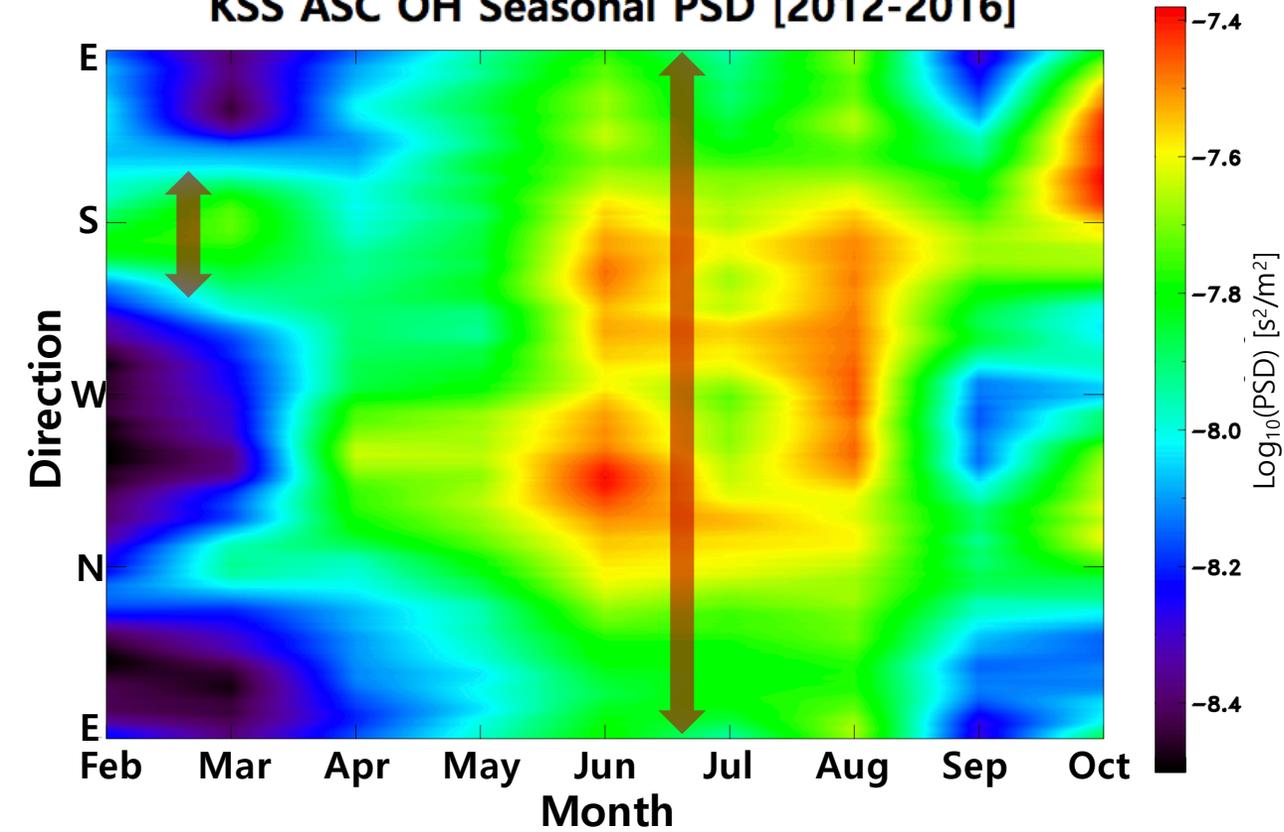
(Complex structures)



평균 PSD로 계절적 패턴 분석

3. 방위각에 따른 PSD 평균값 시계열

KSS ASC OH Seasonal PSD [2012-2016]



우세한 전파 방향

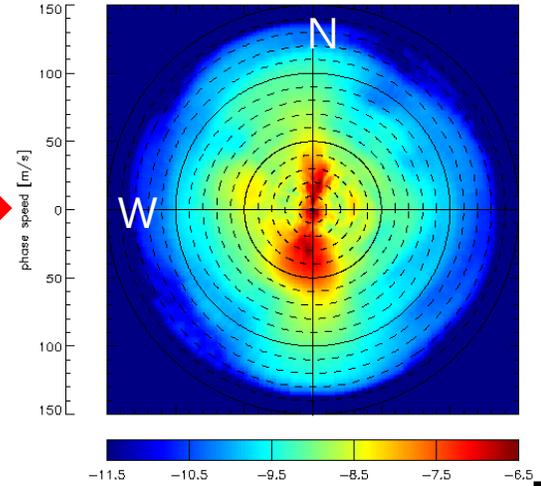
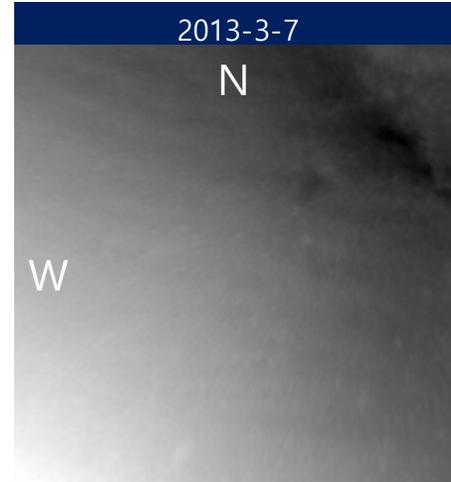
가을: 남향 전파
겨울: 서향 전파
봄: 남동향 전파

파동 활동성
(파워 & 전파 분포)

가을 < 봄 < 겨울

가을 & 봄
→ 단색파 구조

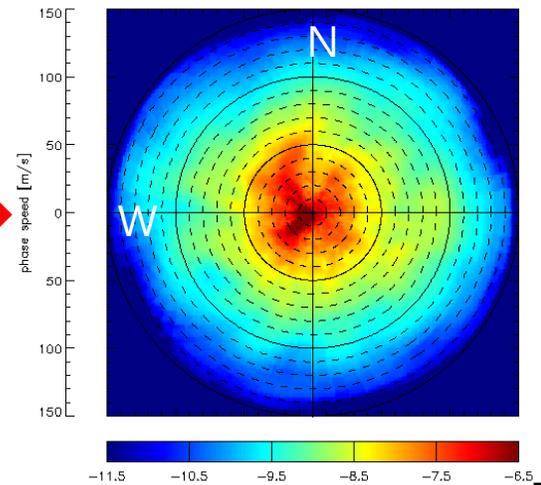
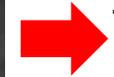
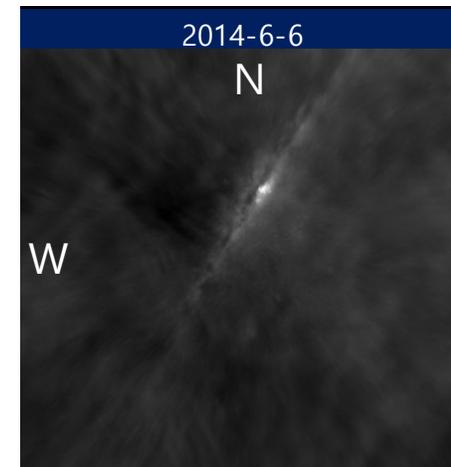
(Quasi-monochromatic structures)



겨울

→ 복합 구조

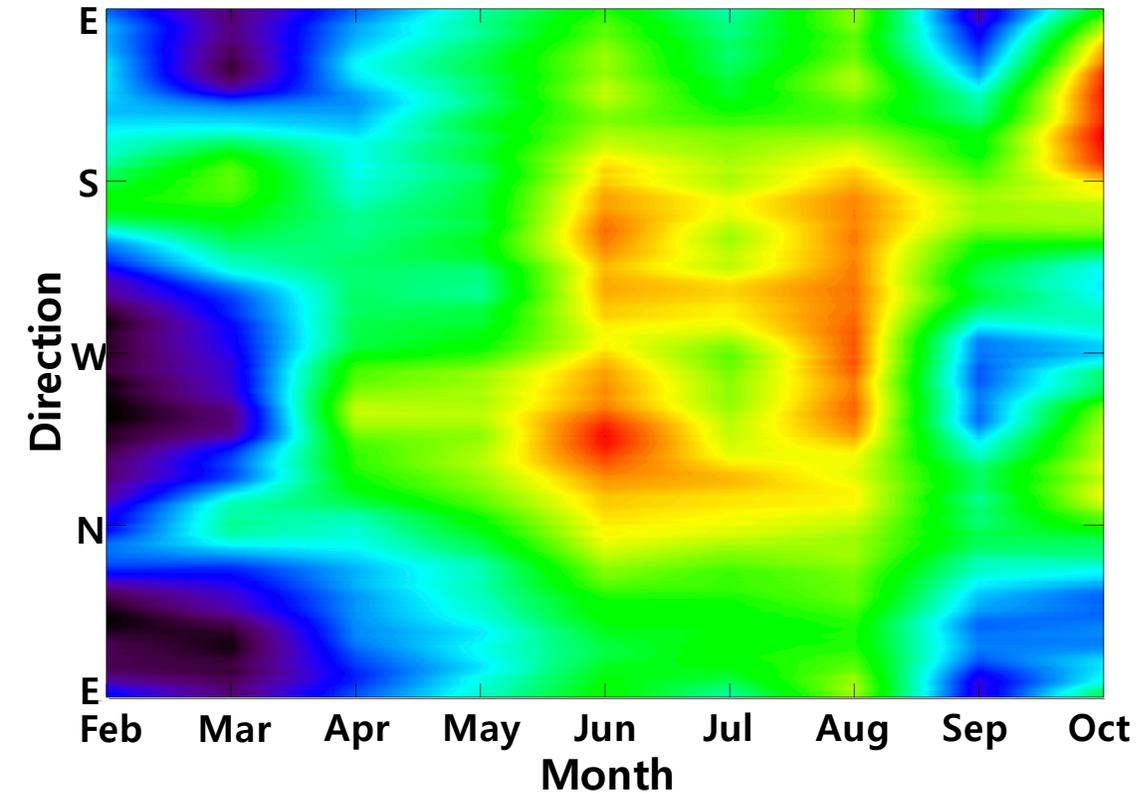
(Complex structures)



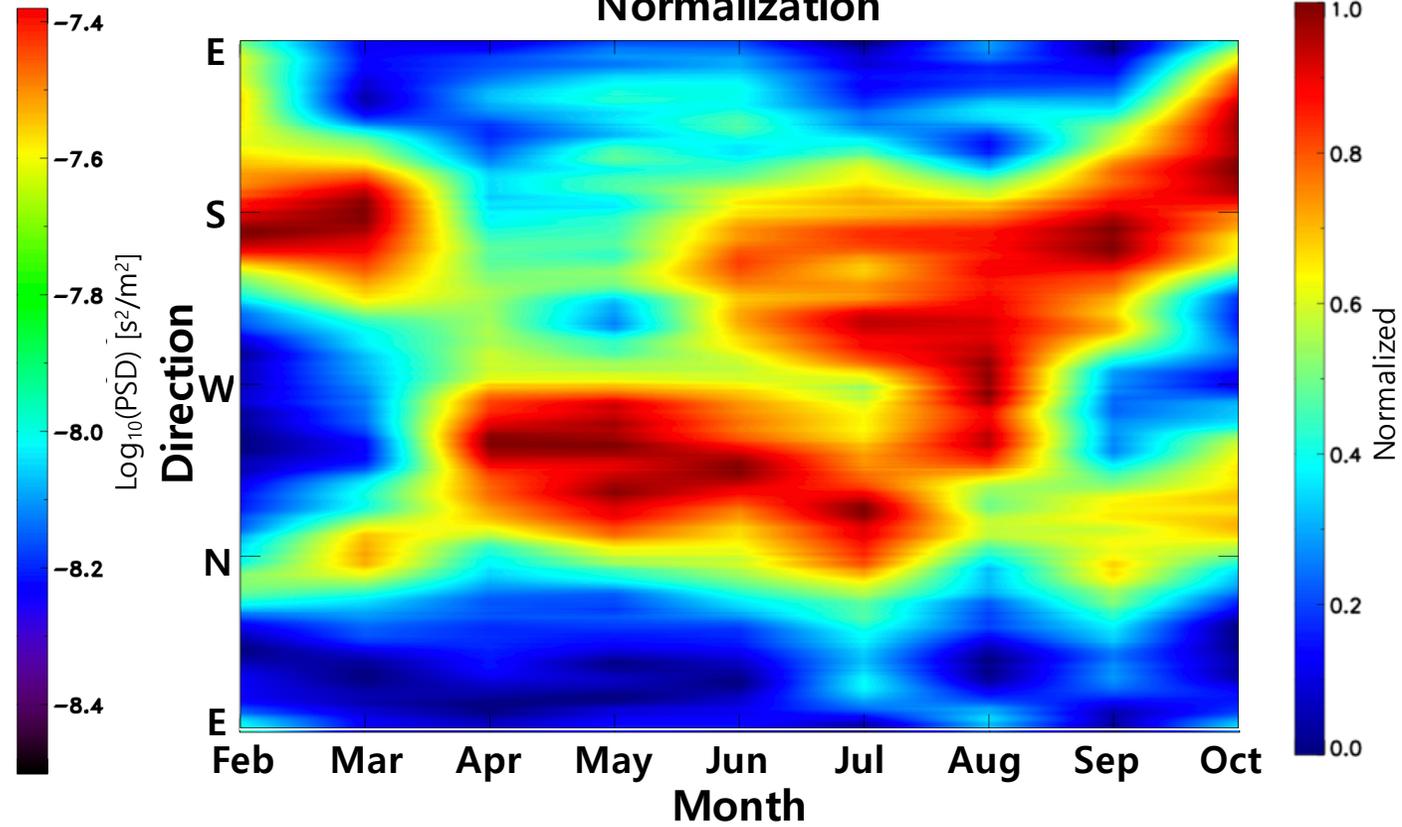
GW 방향성 - 표준화



KSS ASC OH Seasonal PSD [2012-2016]



Normalization



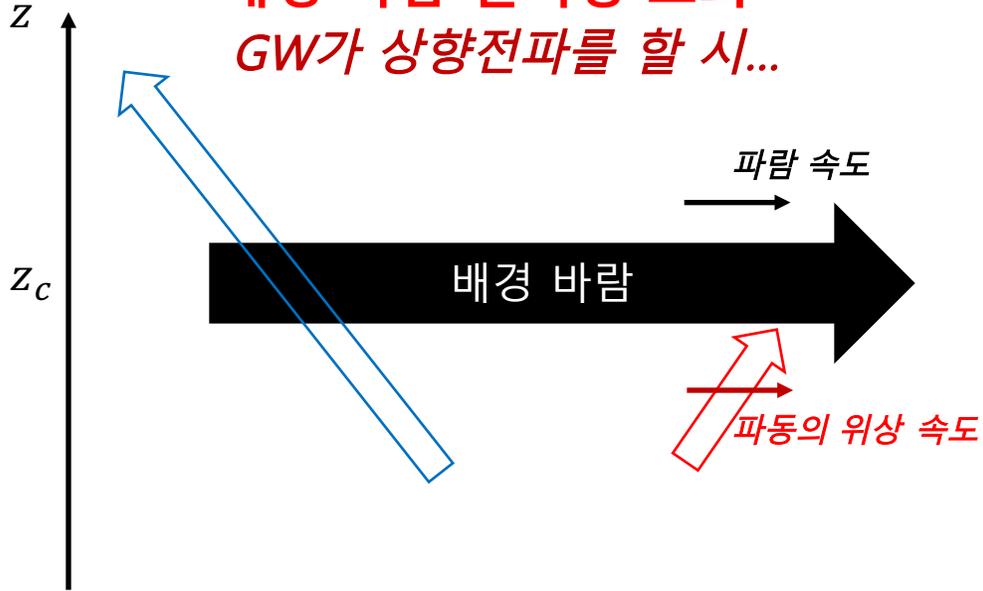
계절별 우세한 GW 전파 방향을 살펴보고자
월별 평균 PSD에 대해 표준화: $\text{PSD}_{\text{Month}}/\text{MAX}(\text{PSD}_{\text{Month}})$

GW 방향성 - 폐색 도표 (Blocking Diagram)

Critical level filtering

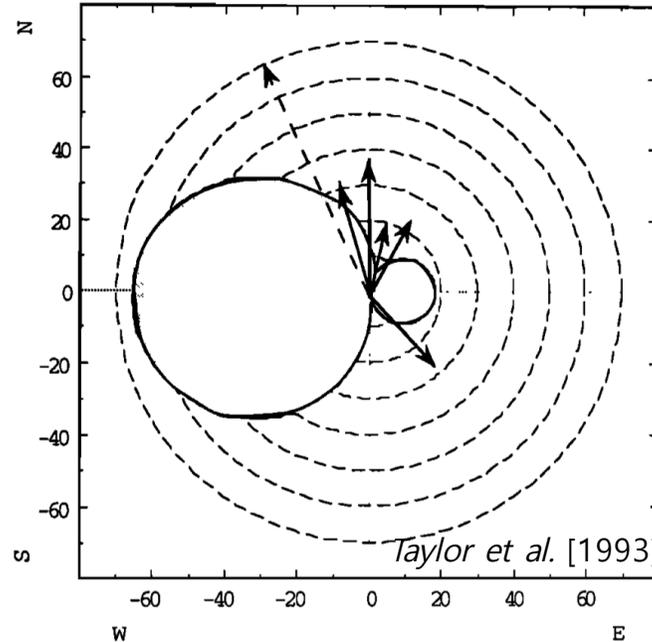
→ 수평바람을 이용한 Blocking diagram으로 추론

배경 바람 필터링 효과
GW가 상향전파를 할 시...



- z_c : 수평파동벡터 \approx 바람벡터에 만족하는 고도
- 고유위상속도 ≈ 0
- 파동이 고도 z_c 에 도달 시
- 난류 형성
- 난류로 인해 파동 파쇄.
- 고도 z_c 위로는 파동의 수직 전파 불가.

폐색 도표



폐색 도표

$$\widehat{c}_h = c_h - (u \cos \theta + v \sin \theta)$$

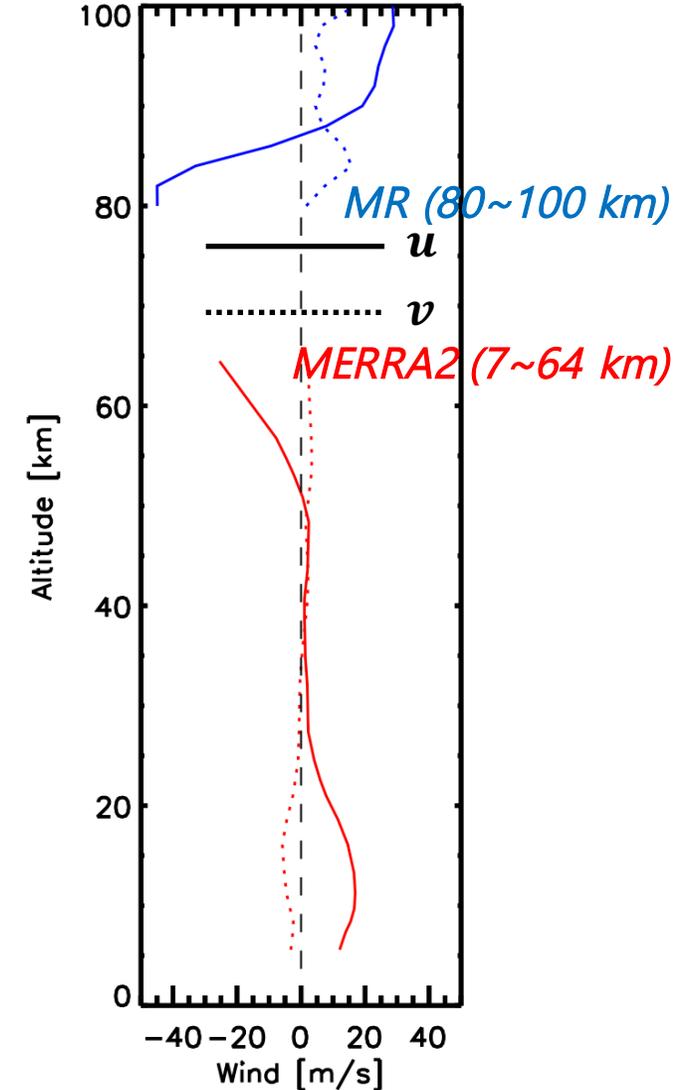
- \widehat{c}_h : 고유 위상 속도
- c_h : 지상 관측 위상 속도

u : 동서바람

v : 남북바람

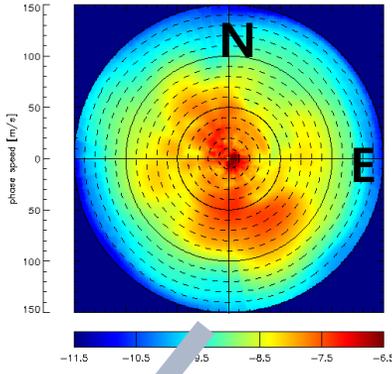
θ : 수평 전파 방향 ($0^\circ \sim 360^\circ$)

Wind profile (19FEB2014)

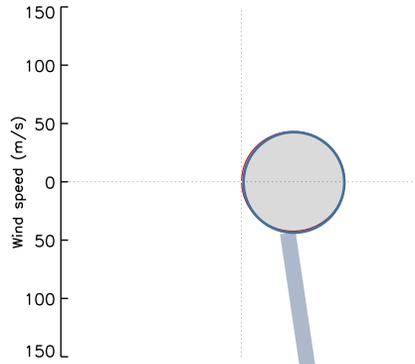


GW 방향성 - 폐색 도표 (Blocking Diagram)

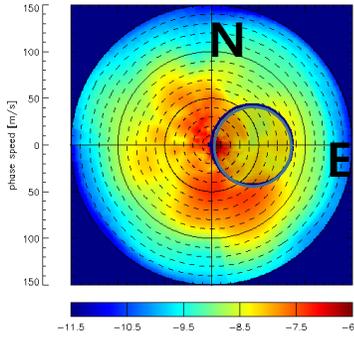
PSD
2014-6-29



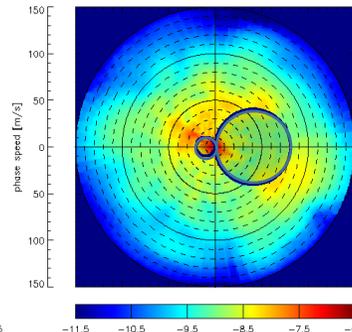
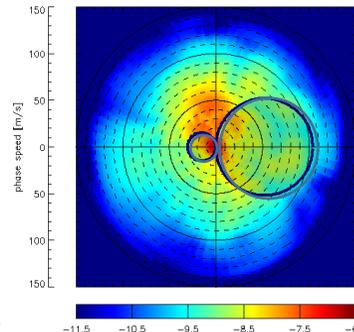
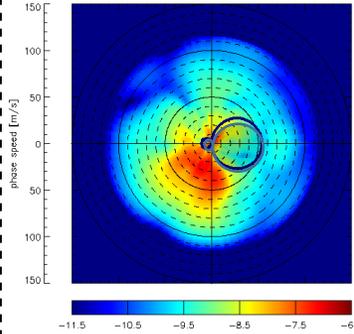
Blocking diagram
2014-6-29



관측된
파동분포



파동의
수직전파가
제한된 영역

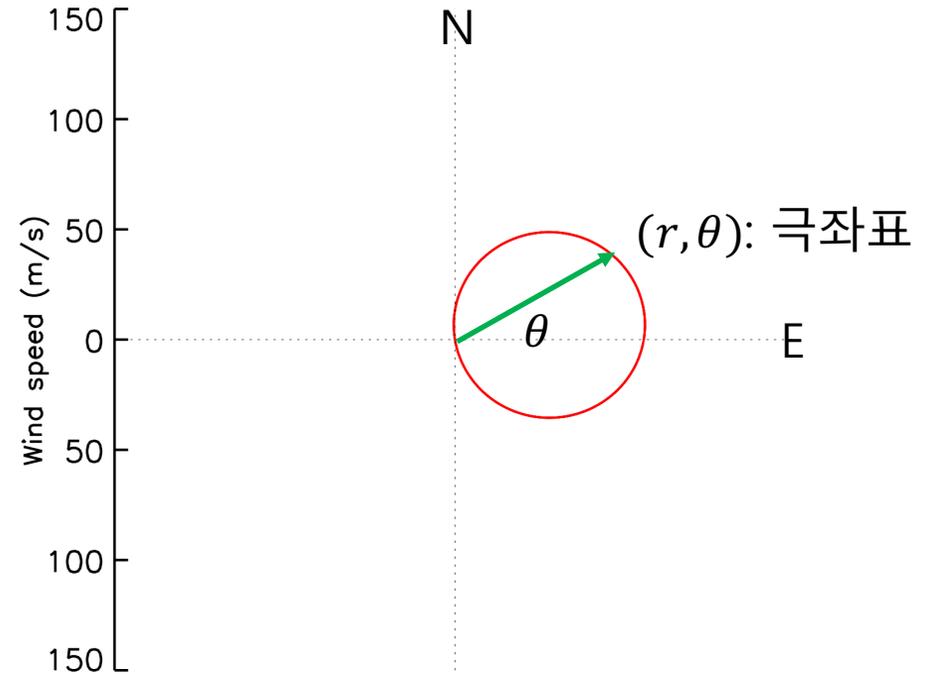


배경 바람 선별 영역: 10-64 km & 80-90 km

- MERRA2: 10 km ~ 64 km

- MR: 80 ~ 90 km

(OH 대기광의 최대 방출고도는 87 km & FWHM은 8 km)



① 107개의 윈도우에 해당하는 개별 폐색 도표 계산
← 바람 선별 영역 내 수평바람의 최대값으로 계산

② 월 별 평균

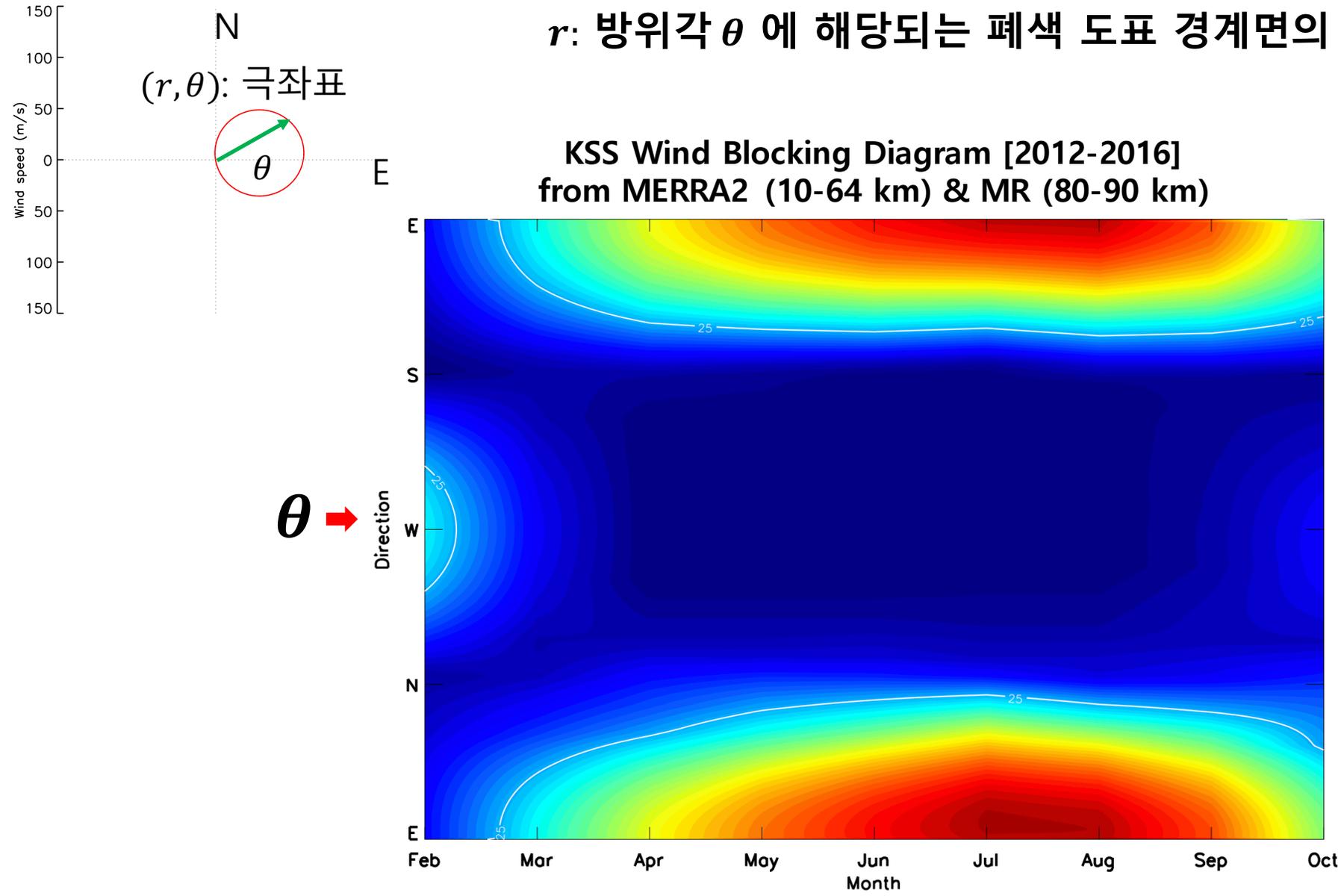
③ 폐색 도표의 경계선에 대해 극좌표로 표현 (r, θ)

: r - 방위각 θ 에 해당되는 폐색 도표 경계선의 원점으로부터의 거리
→ 분해능: 1m/s & 1°

GW 방향성 - 기후학적 폐색 도표 (Climatologic Blocking diagram)



r : 방위각 θ 에 해당되는 폐색 도표 경계면의 원점으로부터의 거리



r



80

60

40

20

0

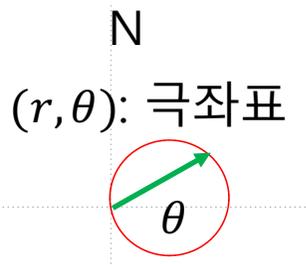
Horizontal Wind [m/s]



파동의 상향전파
불리함



파동의 상향전파
용이함



θ



Direction

W

N

E

Feb

Mar

Apr

May

Jun

Jul

Aug

Sep

Oct

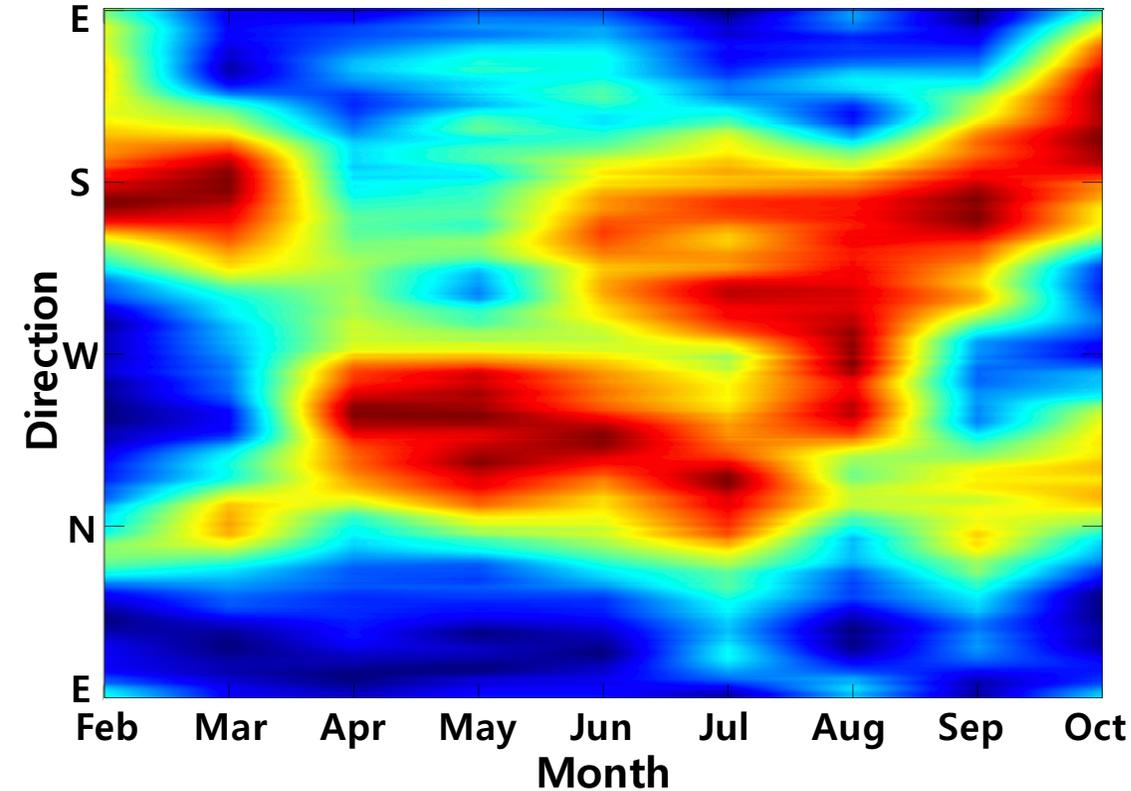
Month

GW 방향성 - 기후학적 폐색 도표 (Climatologic Blocking diagram)

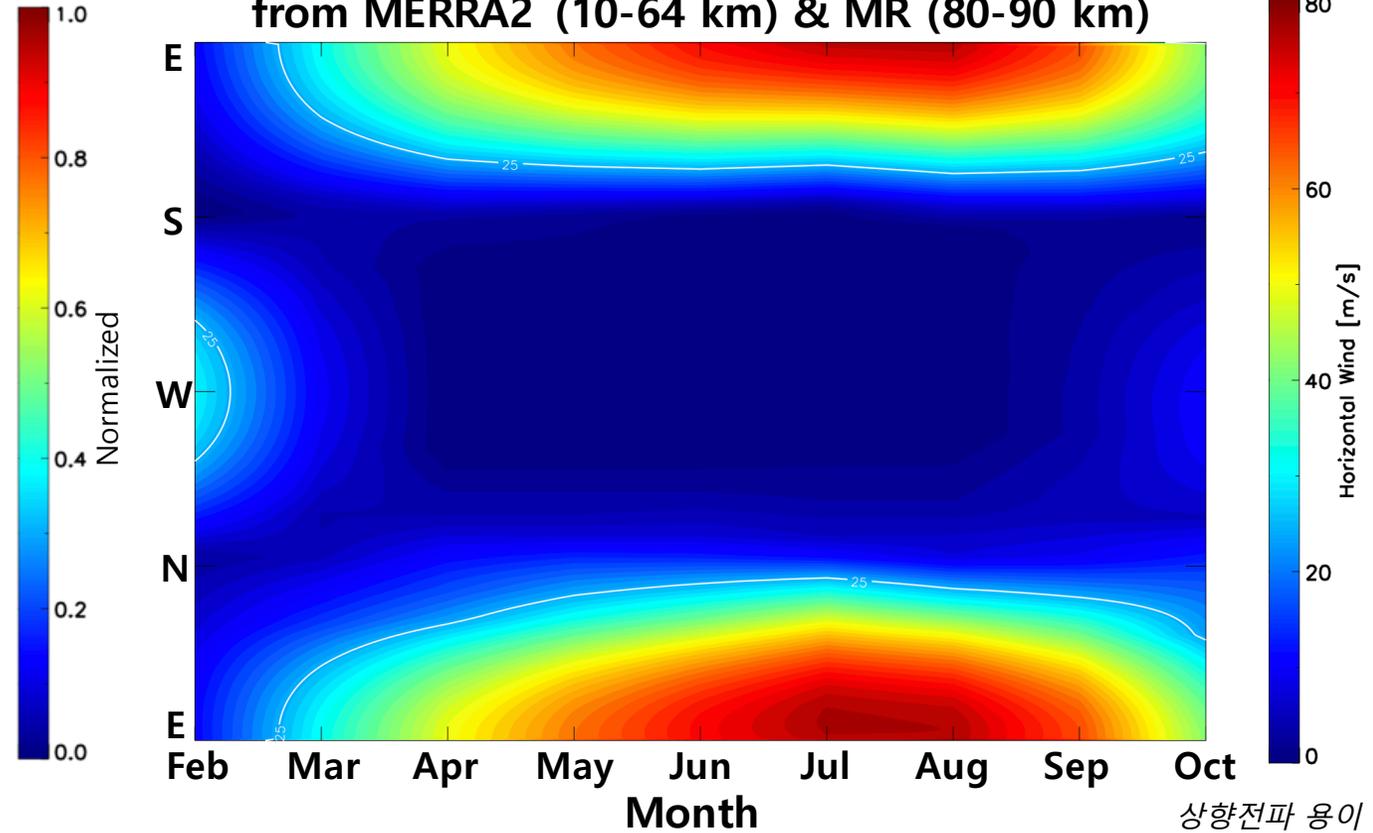


PSD로 부터 알아본 GW의 계절적 방향성(왼쪽)과 폐색 도표(오른쪽)의 비교

PSD Normalization



KSS Wind Blocking Diagram [2012-2016]
from MERRA2 (10-64 km) & MR (80-90 km)



상항전파 불리

상항전파 용이

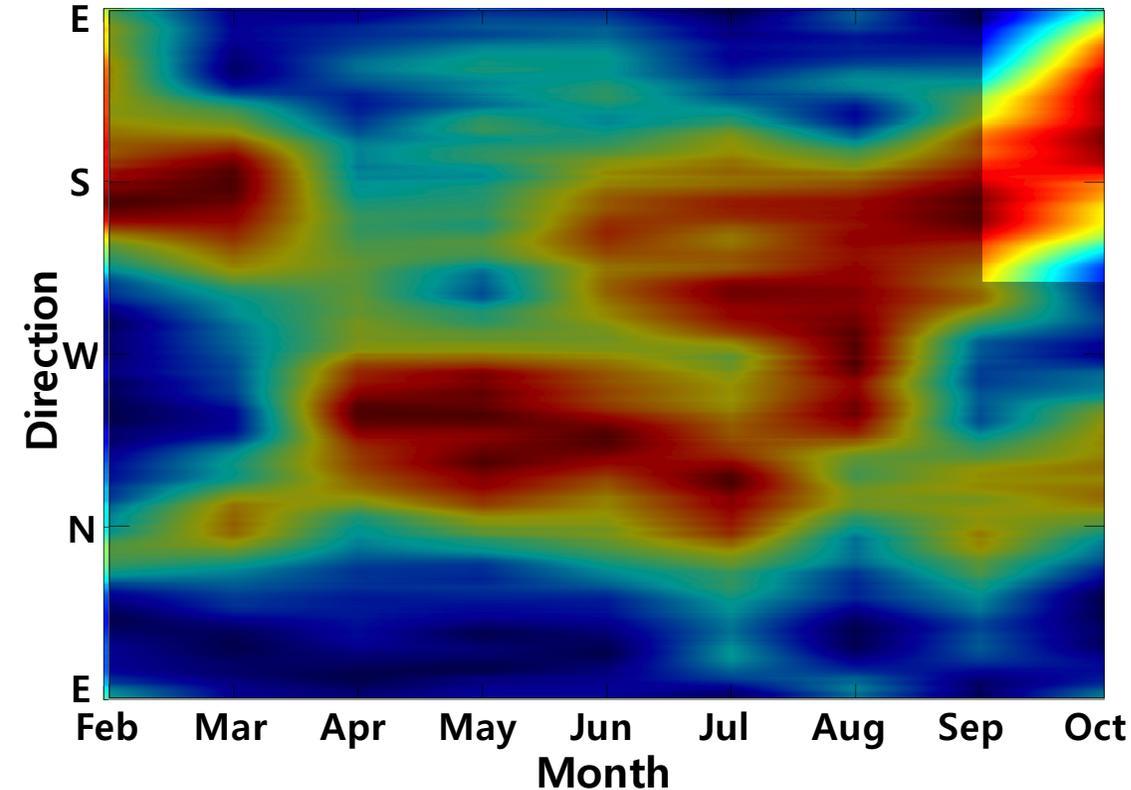
GW PSD와 바람 폐색 도표 간 유의한 반상호관계
 → ASC 관측을 통한 명백한 파동의 배경 바람 필터링 증거 ??

GW 방향성 - 기후학적 폐색 도표 (Climatologic Blocking diagram)

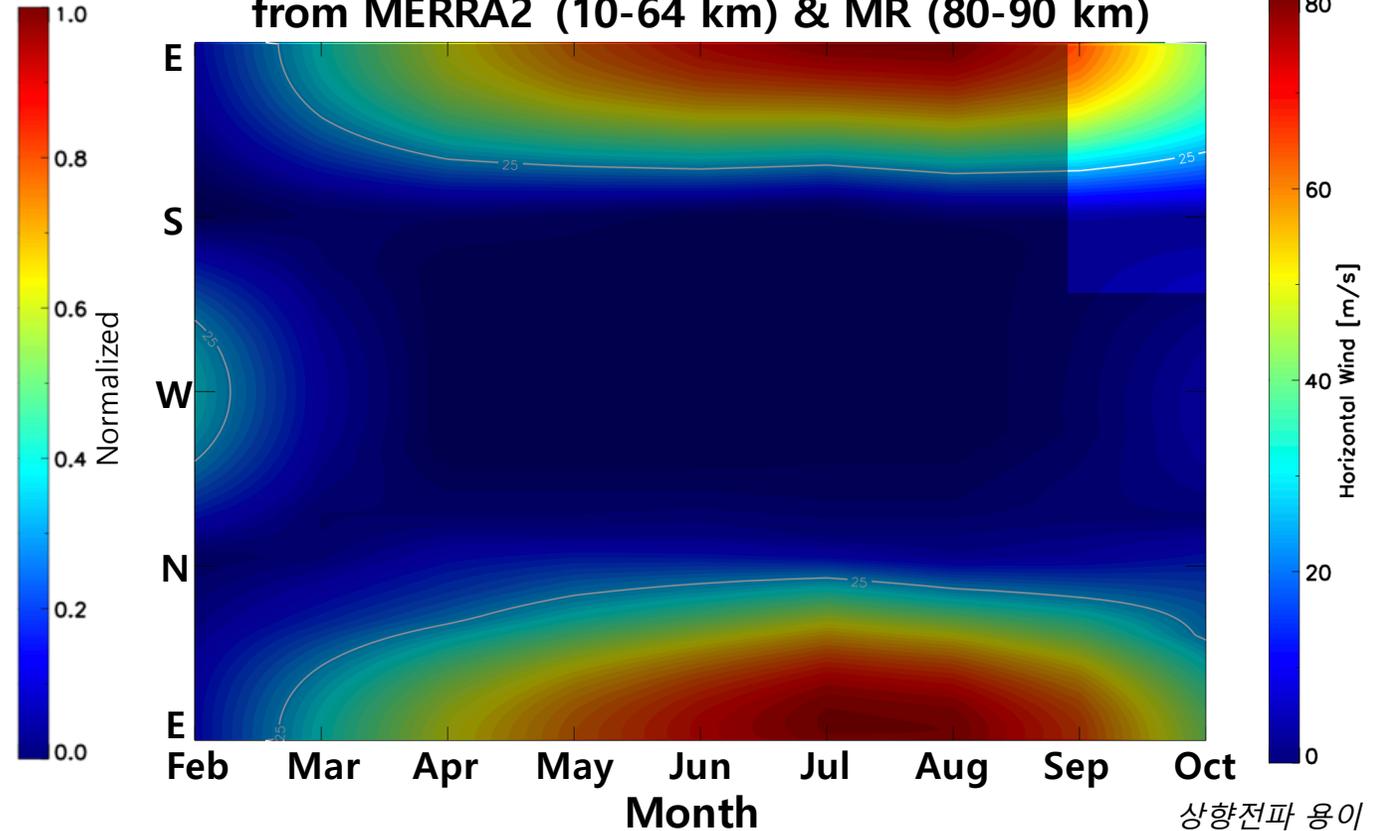


PSD로 부터 알아본 GW의 계절적 방향성(왼쪽)과 폐색 도표(오른쪽)의 비교

PSD Normalization



KSS Wind Blocking Diagram [2012-2016]
from MERRA2 (10-64 km) & MR (80-90 km)



상향전파 불리

상향전파 용이

폐색 도표를 따르면, 10월 달 남동향 GW 관측 불가.

그러나

10월 달 ASC 관측에 따르면 남동향 GW가 수직전파 제한 구간임에 불구하고 관측.



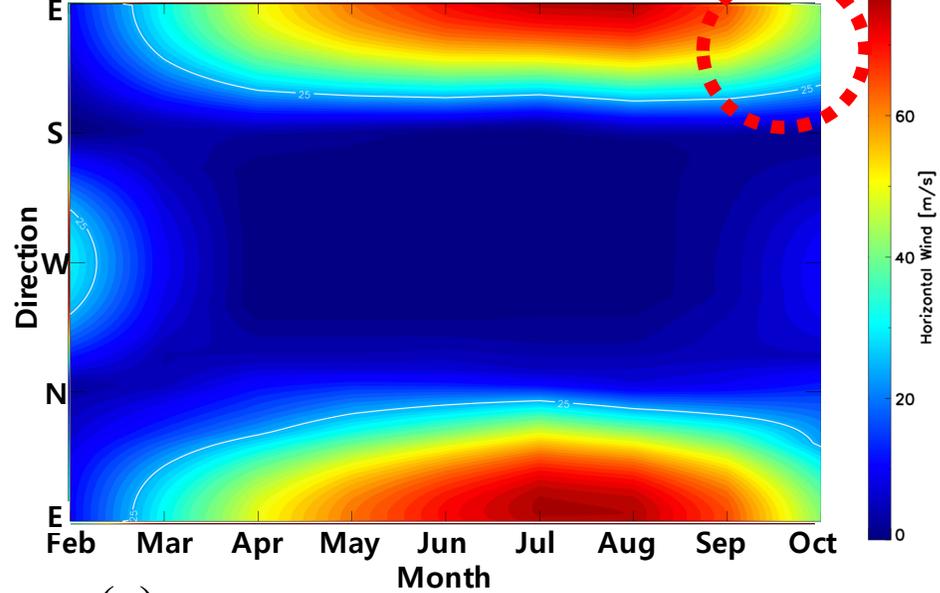
10월 달 남동향 GW의 원천 추론

KSS Wind Blocking Diagram [2012-2016]

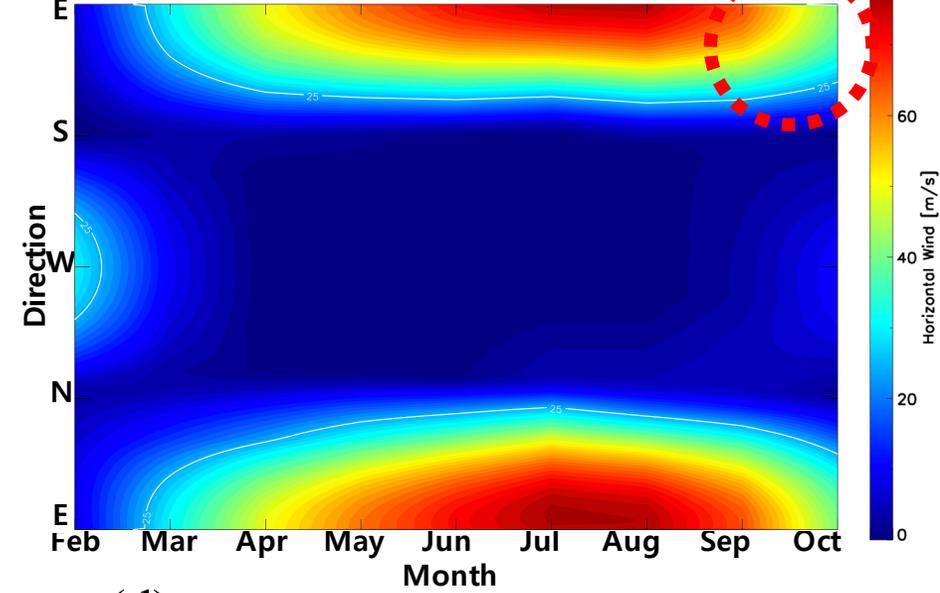
폐색 도표의 하한 고도 설정 변경

- (a): 10-64 km, 80-90 km
- (b): 30-64 km, 80-90 km
- (c): 40-64 km, 80-90 km
- (d): 50-64 km, 80-90 km

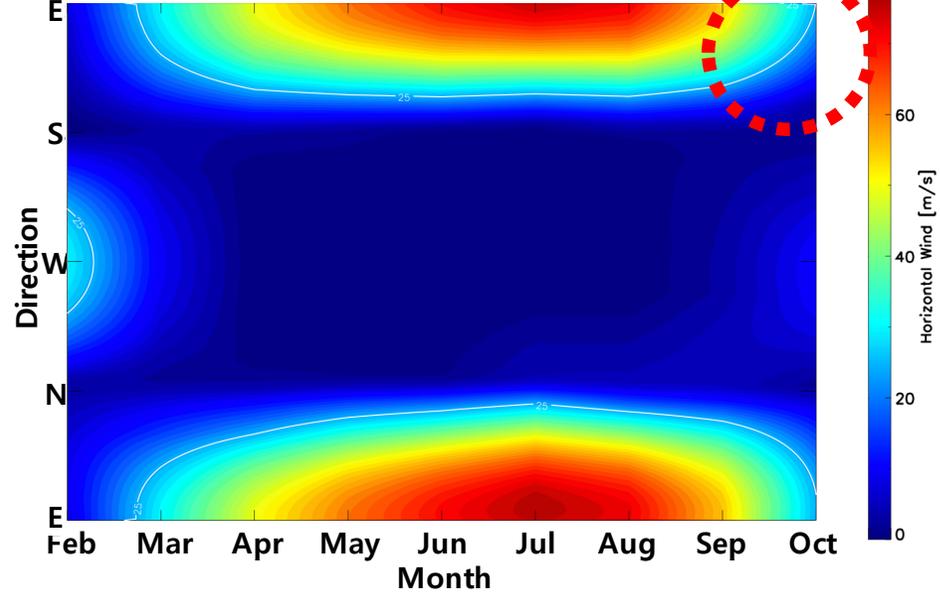
(a) MERRA2 (10-64 km) & MR (80-90 km)



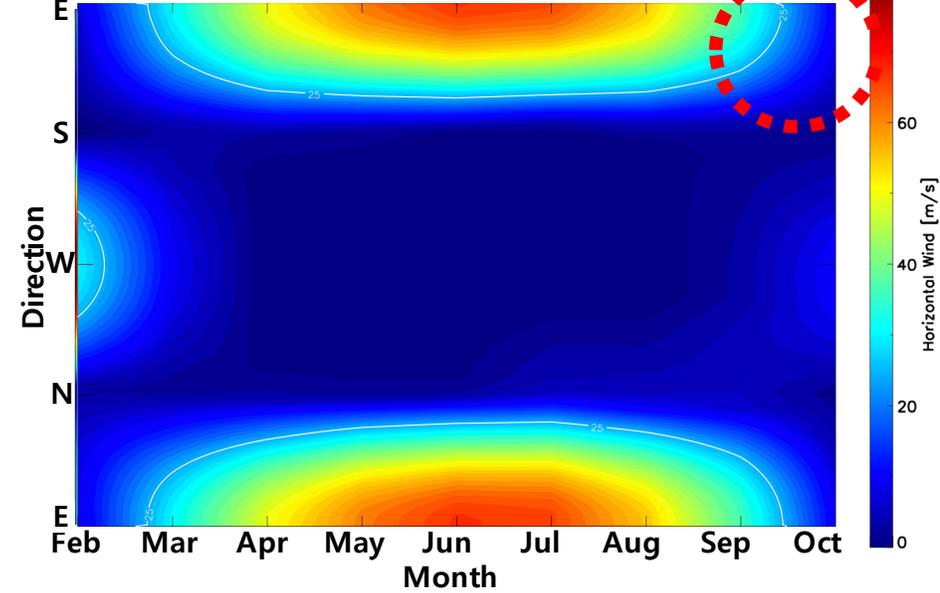
(b) MERRA2 (30-64 km) & MR (80-90 km)



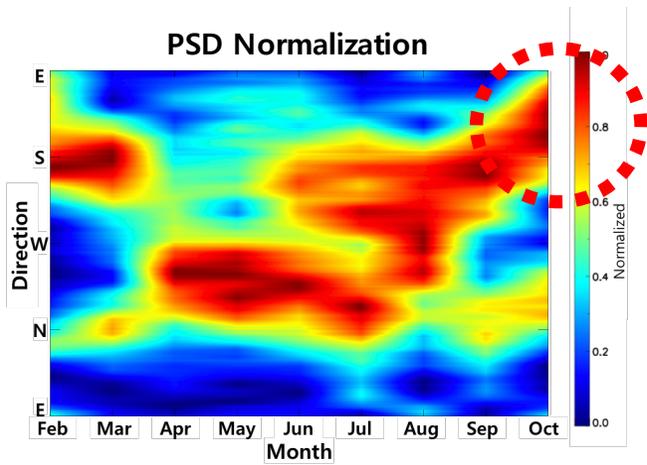
(c) MERRA2 (40-64 km) & MR (80-90 km)



(d) MERRA2 (50-64 km) & MR (80-90 km)



PSD Normalization

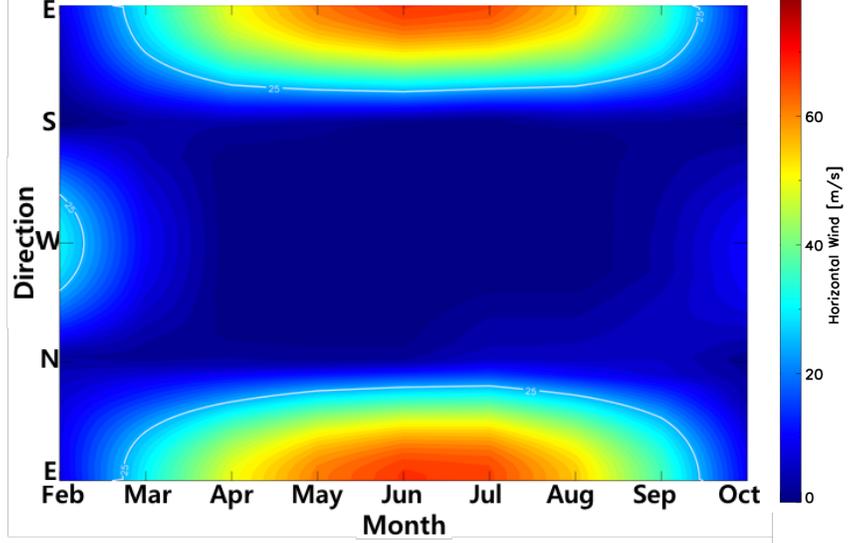


10월 달 남동향 GW의 원천 추론

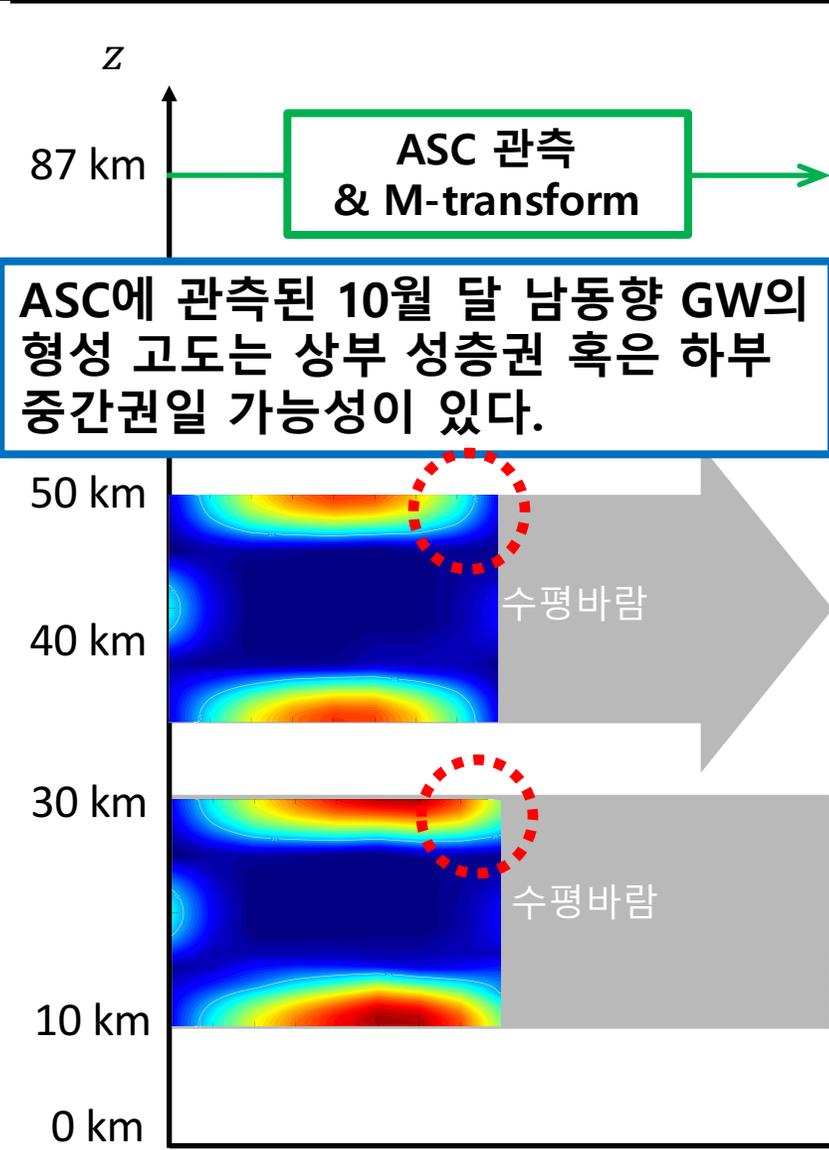
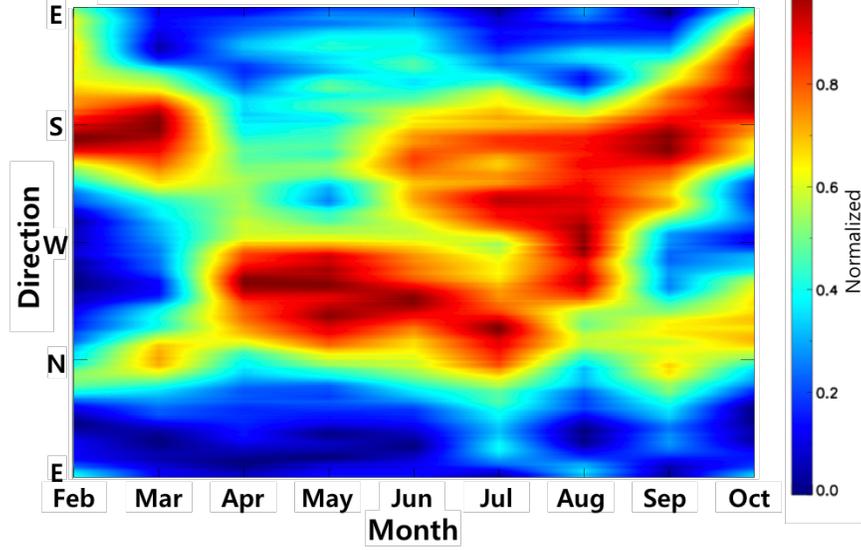


KSS Wind Blocking Diagram [2012-2016]

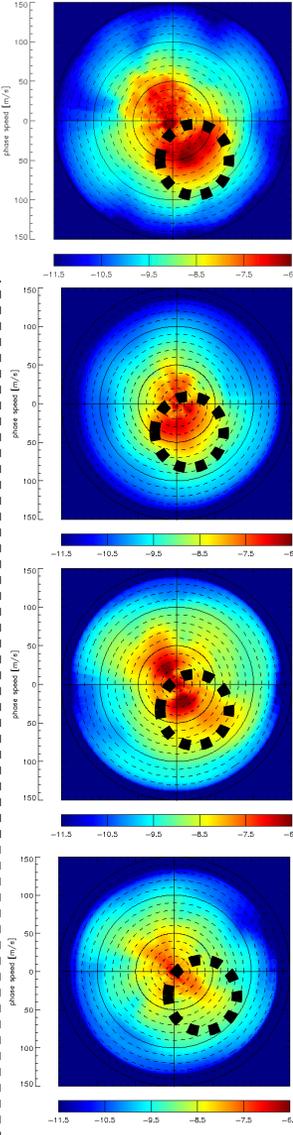
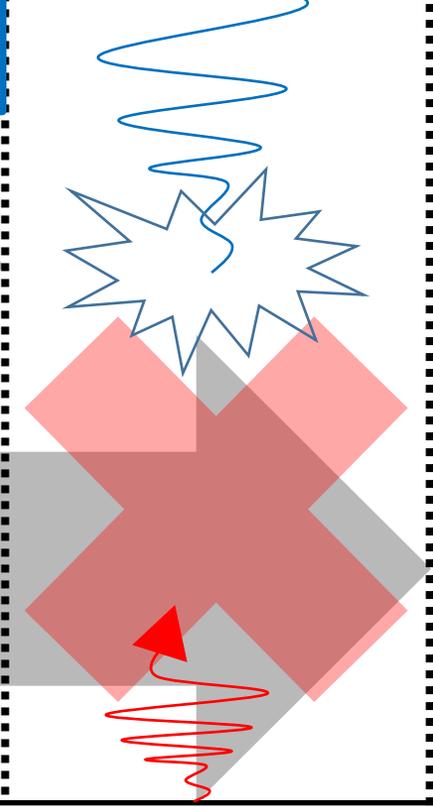
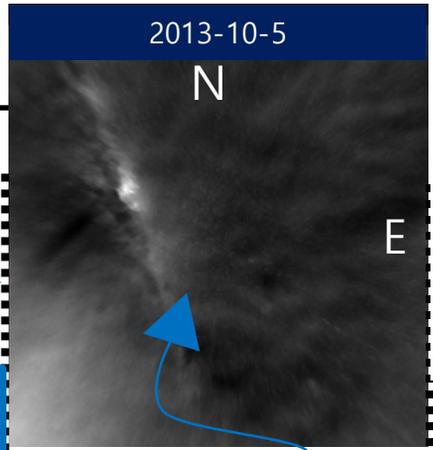
MERRA2 (50-64 km) & MR (80-90 km)



PSD Normalization



ASC에 관측된 10월 달 남동향 GW의 형성 고도는 상부 성층권 혹은 하부 중간권일 가능성이 있다.



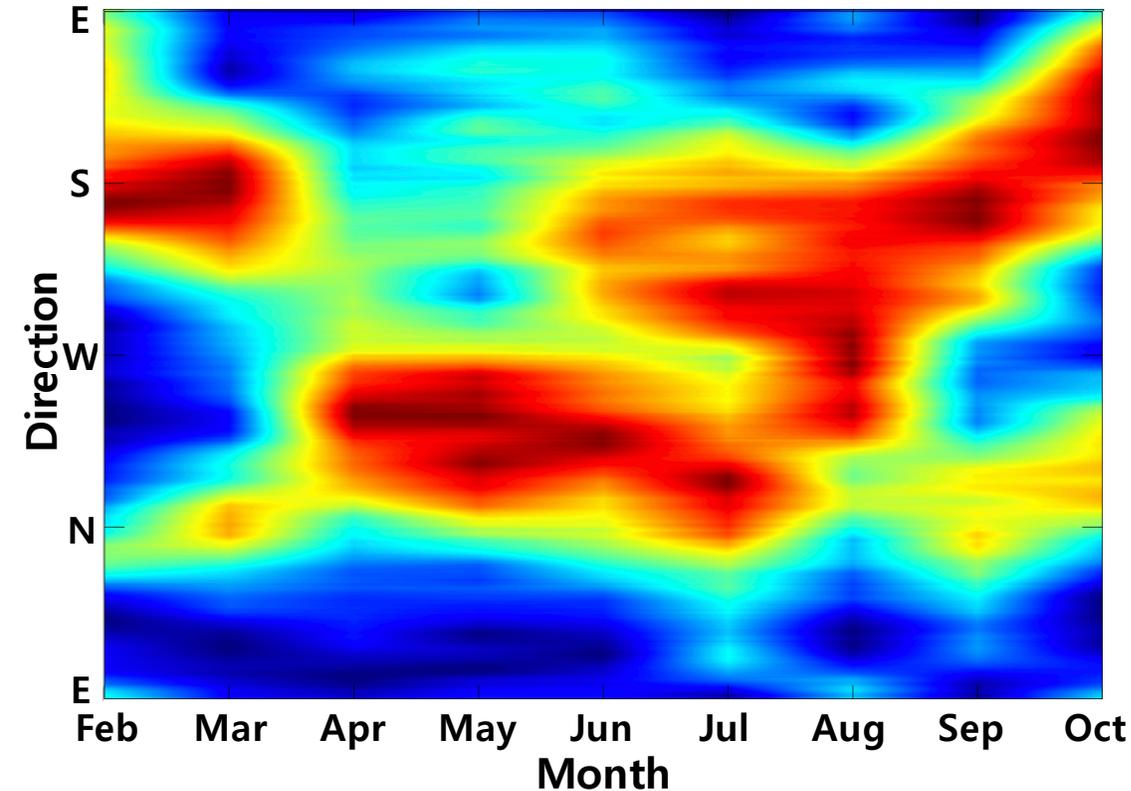
10 m/s 50 m/s
남동향 c_h , 배경바람

GW 방향성 - 기후학적 폐색 도표 (Climatologic Blocking diagram)

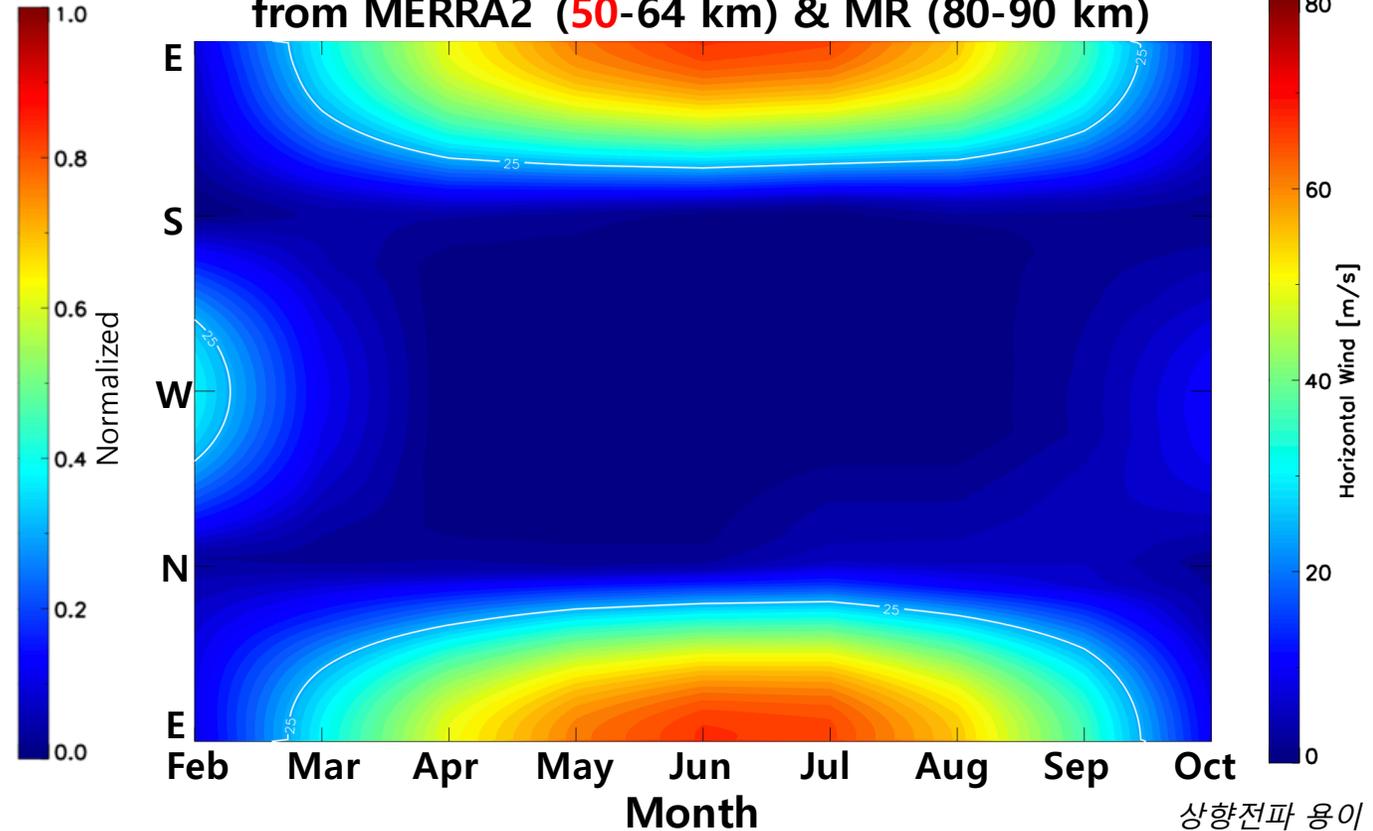


PSD로 부터 알아본 GW의 계절적 방향성(왼쪽)과 폐색 도표(오른쪽)의 비교

PSD Normalization



KSS Wind Blocking Diagram [2012-2016] from MERRA2 (50-64 km) & MR (80-90 km)



상향전파 불리

상향전파 용이

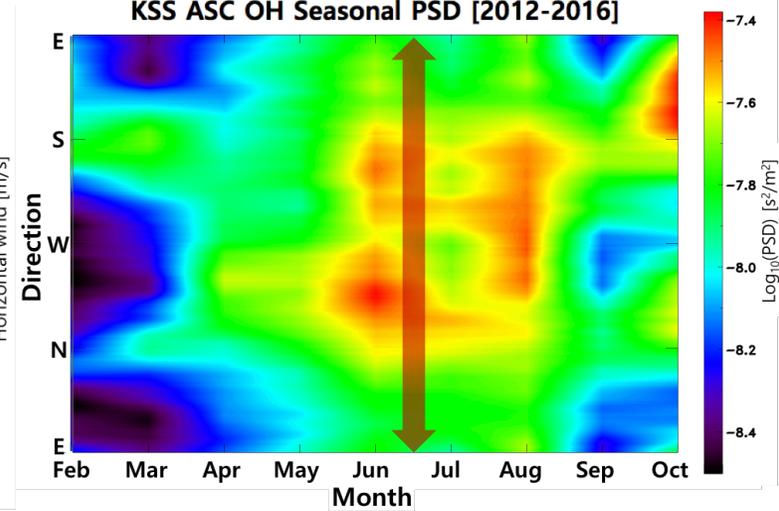
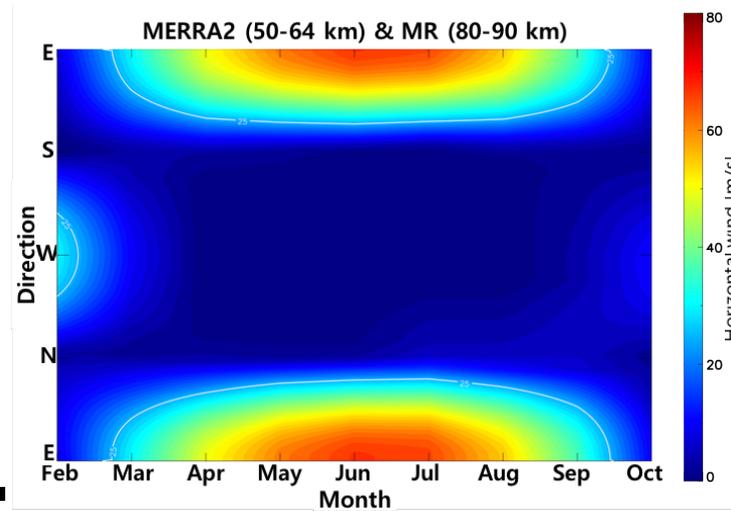
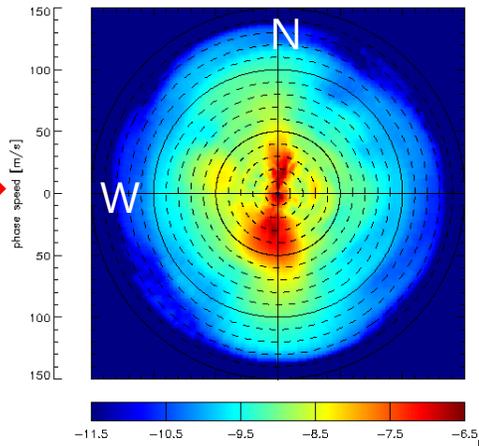
GW PSD와 바람 폐색 도표 간 유의한 반상호관계

→ ASC 관측을 통한 명백한 파동의 배경 바람 필터링 증거 !!

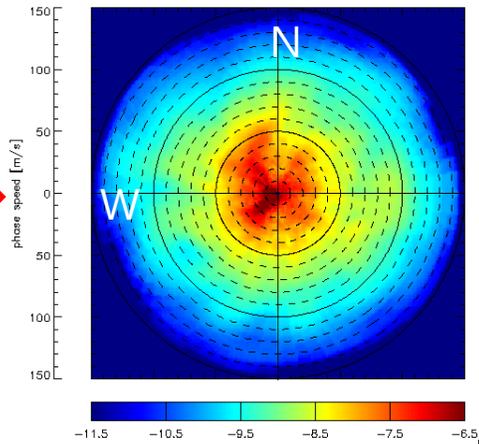
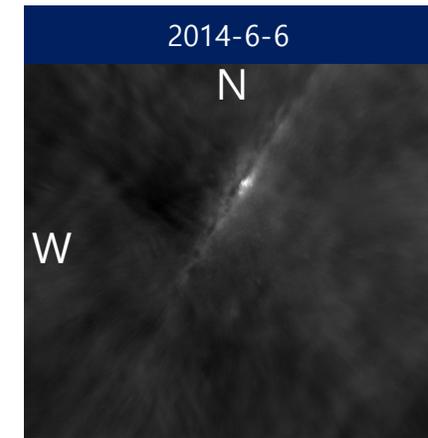
→ 10월 달 남동향 GW의 원천은 하부 중간권 혹은 상부 성층권일 가능성

겨울철 GW의 복합 구조

가을 & 봄 → 단색파 구조
(Quasi-monochromatic structures)



겨울 → 복합 구조
(Complex structures)



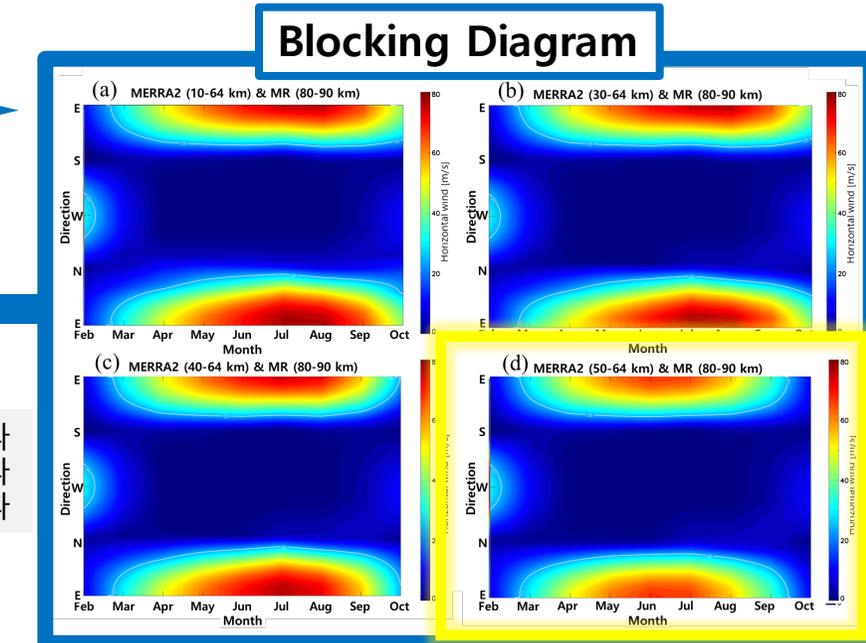
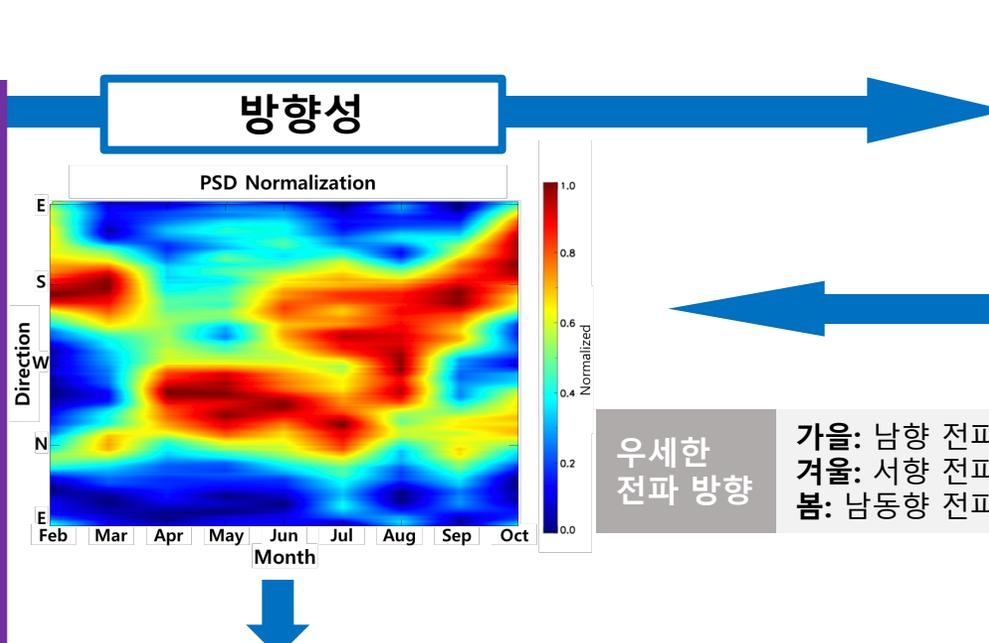
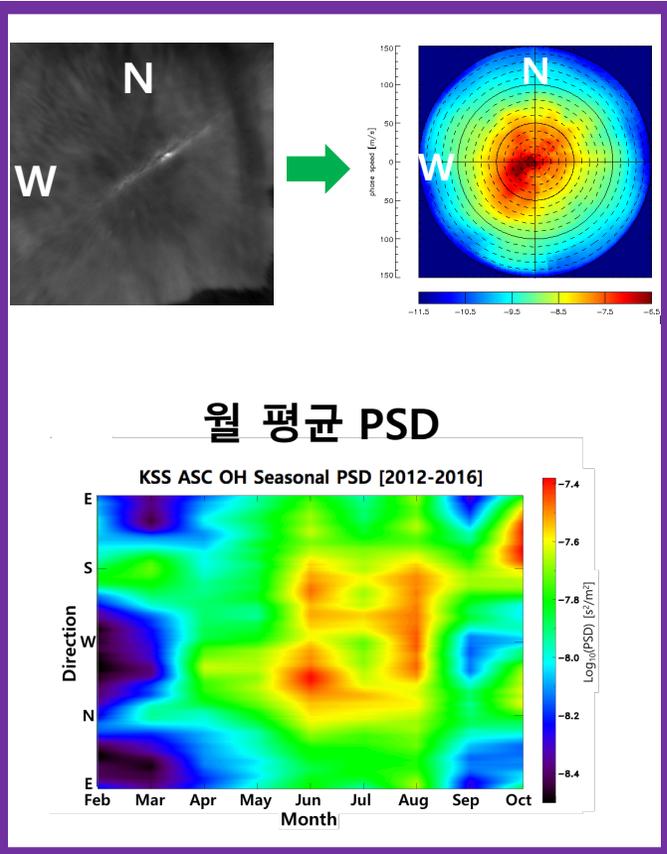
전방향 전파는 이차파동(Secondary gravity waves)의 관측적 증거
겨울철 남반구 위도 60도, 서경 60도 근처 (세종기지: $62^\circ\text{S}, 58^\circ\text{W}$) 동
향 전파특성을 지닌 이차파동이 상부 성층권 & 하부 중간권에서 잘
발생한다는 연구 결과(모델 & 관측)가 있음 [de Wit et al., 2017;
Becker et al., 2017].

[de Wit et al., 2017]: 유성레이다로 알아본 겨울철 동향 전파의 이차
파동. ← 동향의 배경 바람 필터링에 불구하고 중간권에서 동향 파동
의 운동량이 관측됨.

→ 본 연구는 ASC에 관측된 이차 파동의 증거가 될 수 있다.

요약

✓ 세종기지 대기광 ASC의 5년 (2012-2016) 관측의 M-transform 분석과 MERRA2 (10-64 km) 유성 레이다 (80-90 km)의 수평 바람 자료를 통해 중간권 대기중력파의 계절적 특성 연구



1. 배경 바람 필터링의 관측적 증거
2. 10월 달 남동향 GW의 원천은 하부 중간권 혹은 상부 성층권

겨울철 전방향 전파 특성

3. 선행 연구에서 제기한 겨울철 남극 반도 주변의 동향 전파의 이차파동 (Secondary gravity waves) 의 ASC에서 관측 가능성

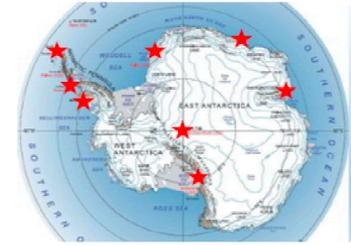
감 사 합 니 다.

Comparison between wind blocking fields and propagating directions of mesospheric gravity waves observed from all-sky imagers over King Sejong Station, Antarctica

Hosik Kam^{1,2}, Yong Ha Kim¹, Jeong-Han Kim², In-Sun Song², Byeong-Gwon Song², Takuji Nakamura^{3,4}, Masaki Tsutsumi^{3,4}, Yoshihiro Tomikawa^{3,4}, Yoshihiro Tomikawa^{3,4}, Mitsumu Ejiri^{3,4}, Masaru Kogure³, Septi Perwitasari³

한국지구과학연합 학술대회
2019.7.3. (화)
평창 알펜시아리조트

Contacts:
Hosik Kam:
kamhosik@cnu.ac.kr
kamhosik@kopri.re.kr



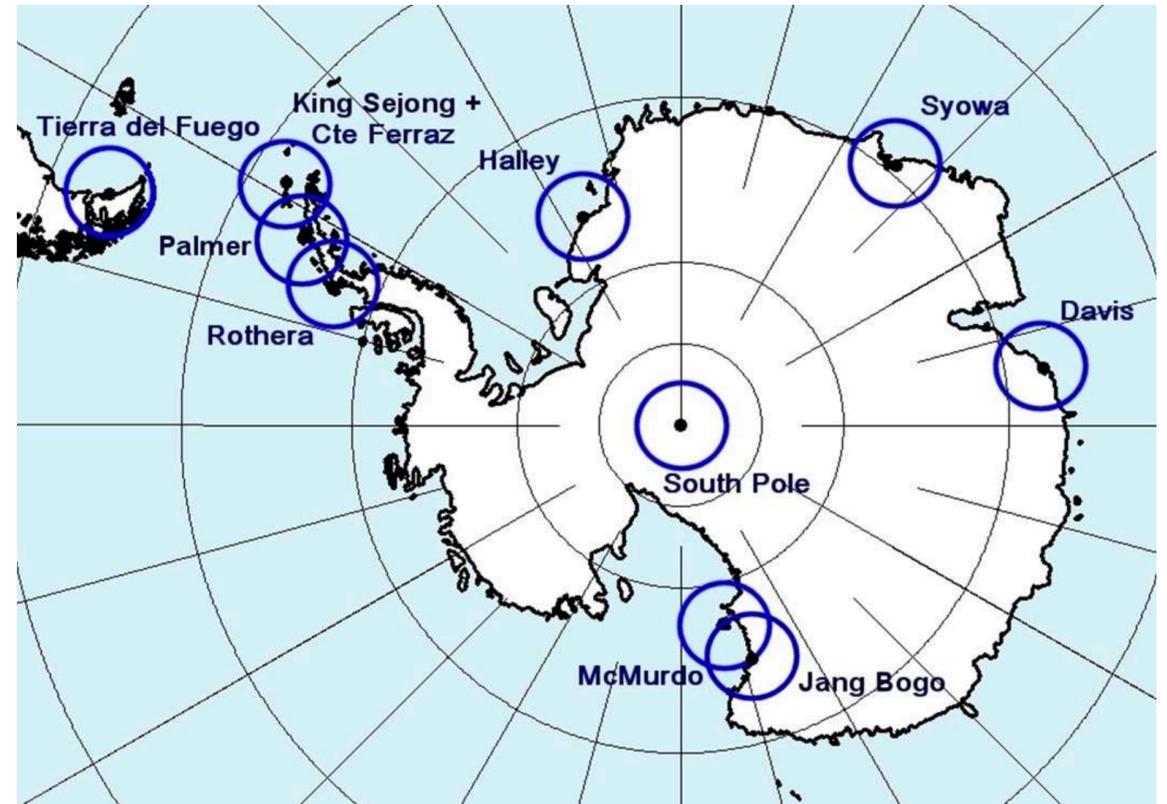
ANGWIN

ANTarctic Gravity Wave Instrument Network

ANGWIN is a “scientist driven” concept that is designed to develop a network of **Antarctic gravity wave observatories**.

Operated by different nations working together in a spirit of close scientific collaboration.

Collaboration between **U.S.A., Japan, U.K., Australia, Brazil, and Korea**



Seasonal GW activity (on analysis...)

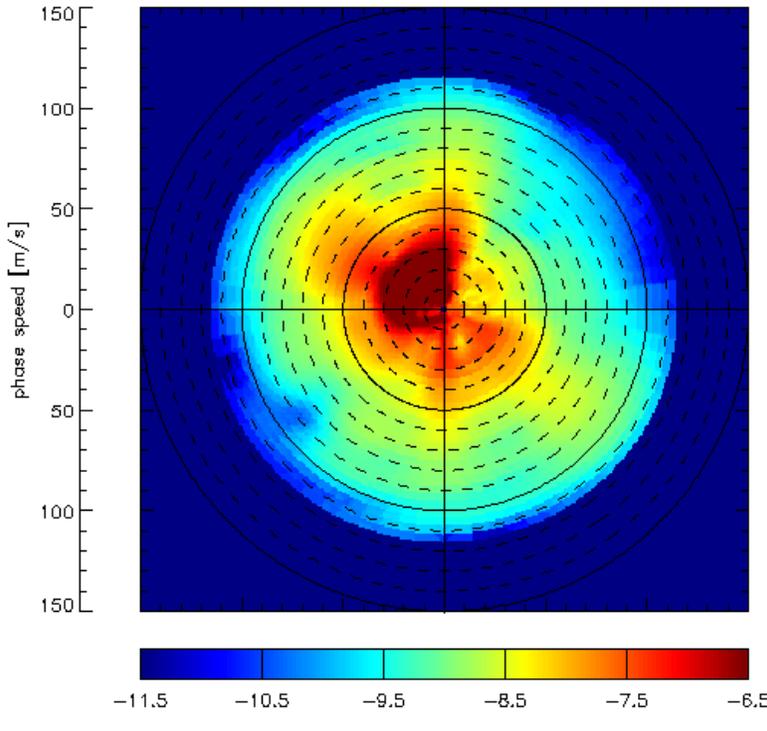
Dominant propagating direction

Fall: Southward
Winter: Westward
Spring: Southern-eastward

Wave activities (power & spread)

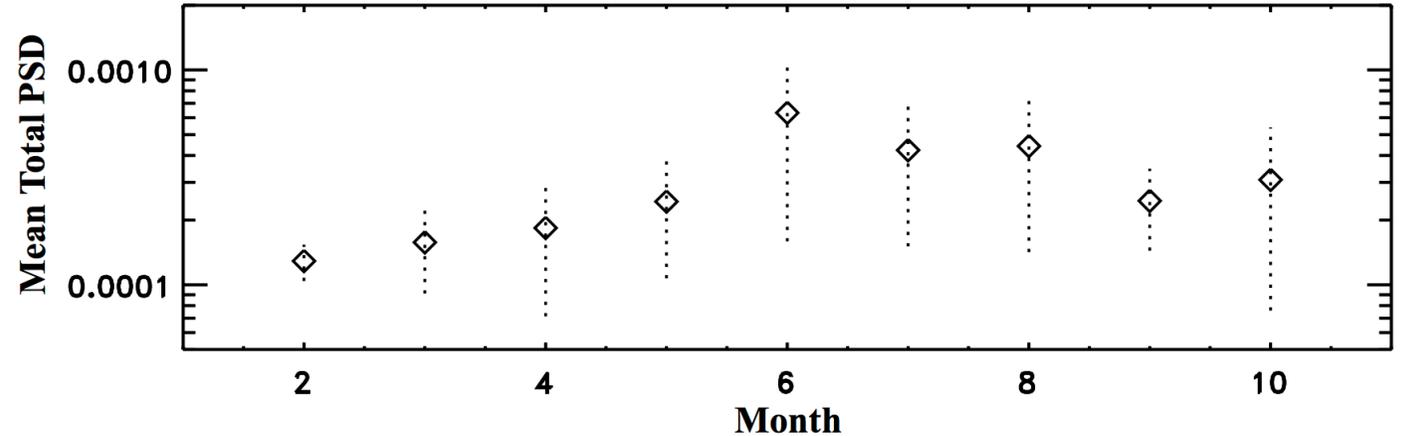
Fall < Spring < Winter

$\sum PSD$ in each PSD distribution
→ Proxy of Wave activity



Monthly averaged total PSD for 5 years

KSS [2012 - 2016]
Monthly Variation of Mean Total Power Spectrum Density



Characteristics of GW activity

- ✓ Maximum at mid-winter (around June solstice)
- ✓ Before mid-winter (Feb~May) < After Mid-winter (Jul~Oct)

Seasonal GW activity (on analysis...)

Dominant propagating direction

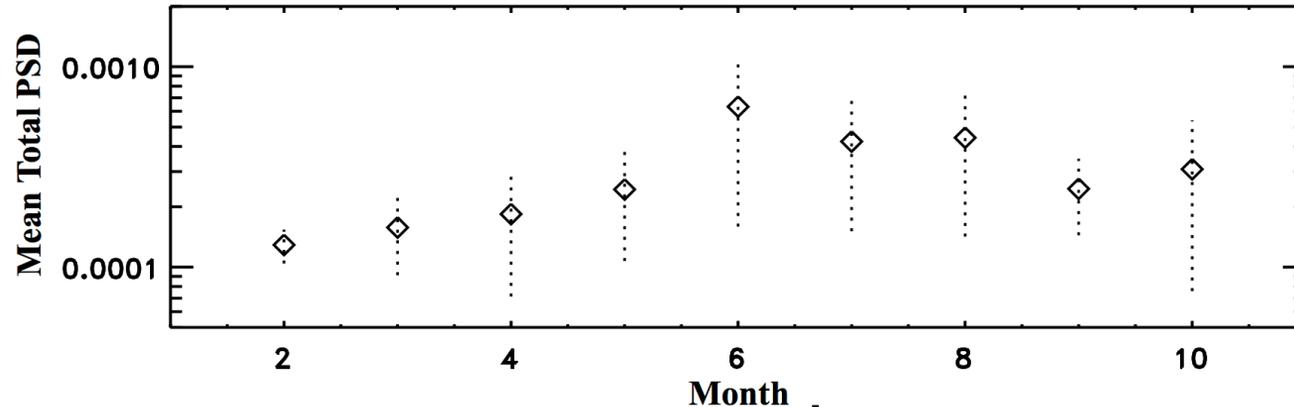
Fall: Southward
 Winter: Westward
 Spring: Southern-eastward

Wave activities (power & spread)

Fall < Spring < Winter

KSS [2012 - 2016]

Monthly Variation of Mean Total Power Spectrum Density



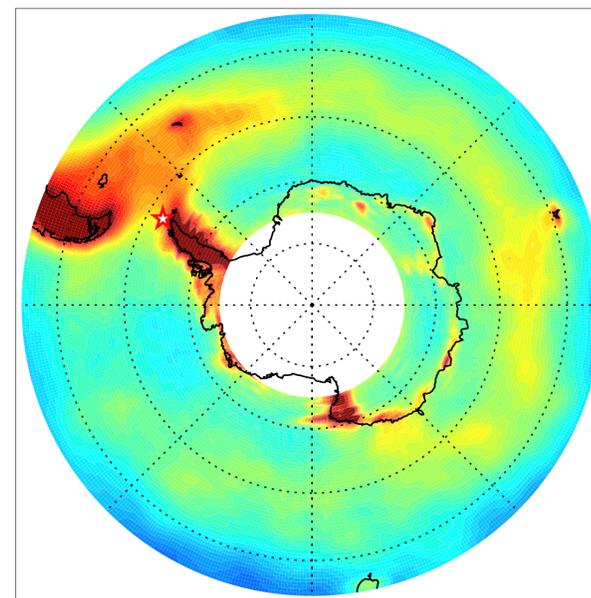
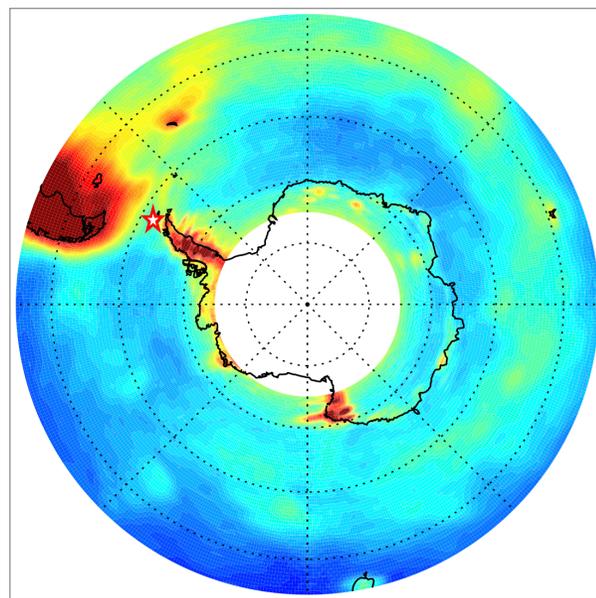
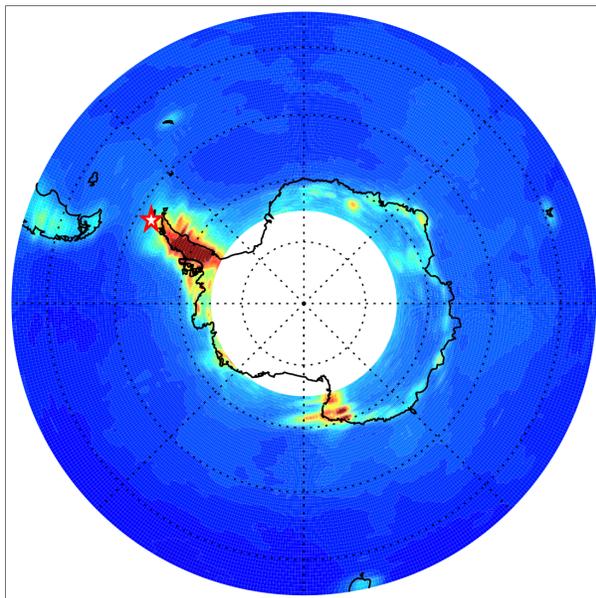
Characteristics of GW activity

- ✓ Maximum at mid-winter
 → Well known as maximum orographic source around June solstice by various studies.
- ✓ Before mid-winter < After Mid-winter

FMAM

Month June

JASO



RNBE (Residual of Nonlinear Balance Equation)
 - **Jet GW diagnosis index**
 - Averaged RNBE between [10hPa ~ 1hPa]
 - Resolution: 0.625° for lon, 0.5° for lat
 → Smoothing by 0.5° in lon

GWs generated from jet show larger at after mid-winter than before mid-winter, but *it can not be contributed as much as orographic source at June.*

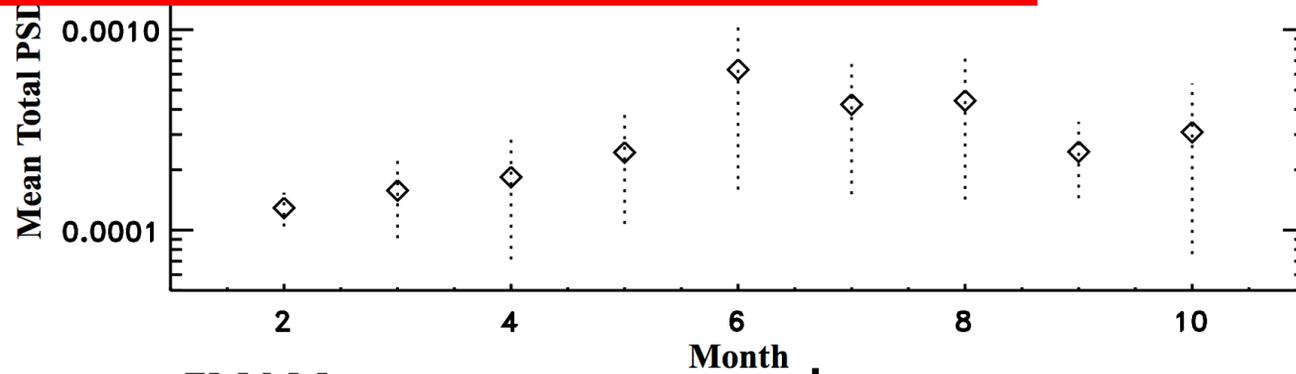
Dominant propagating direction

Fall: Southward
Winter: Northern-westward
Spring: Southern-eastward

Wave activities (power & spread)

Fall < Spring < Winter

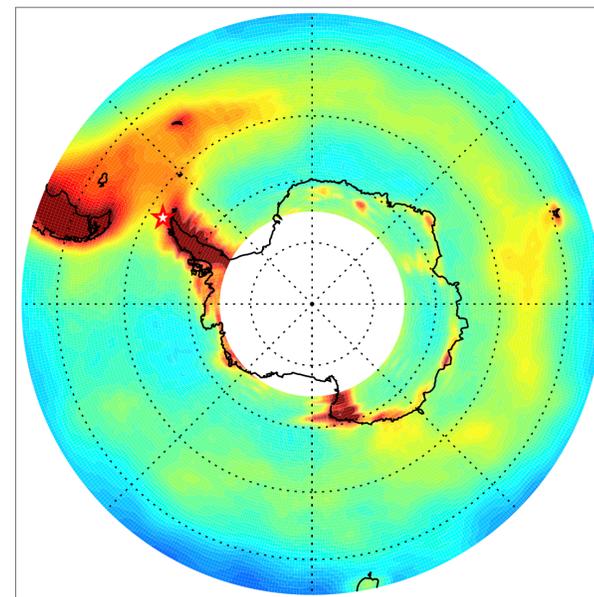
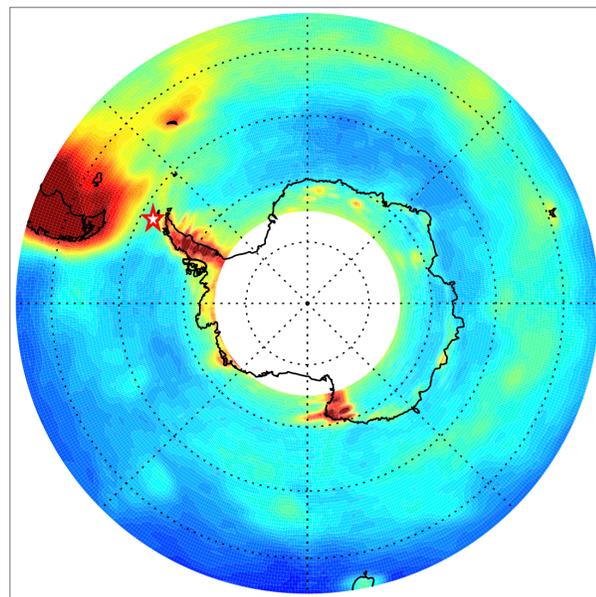
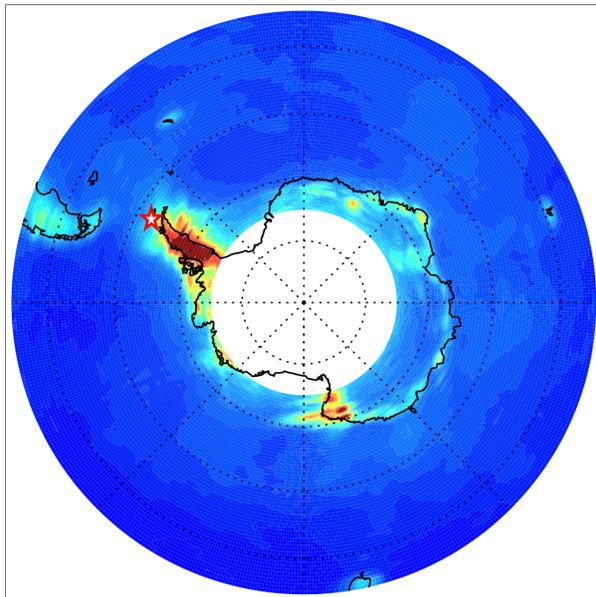
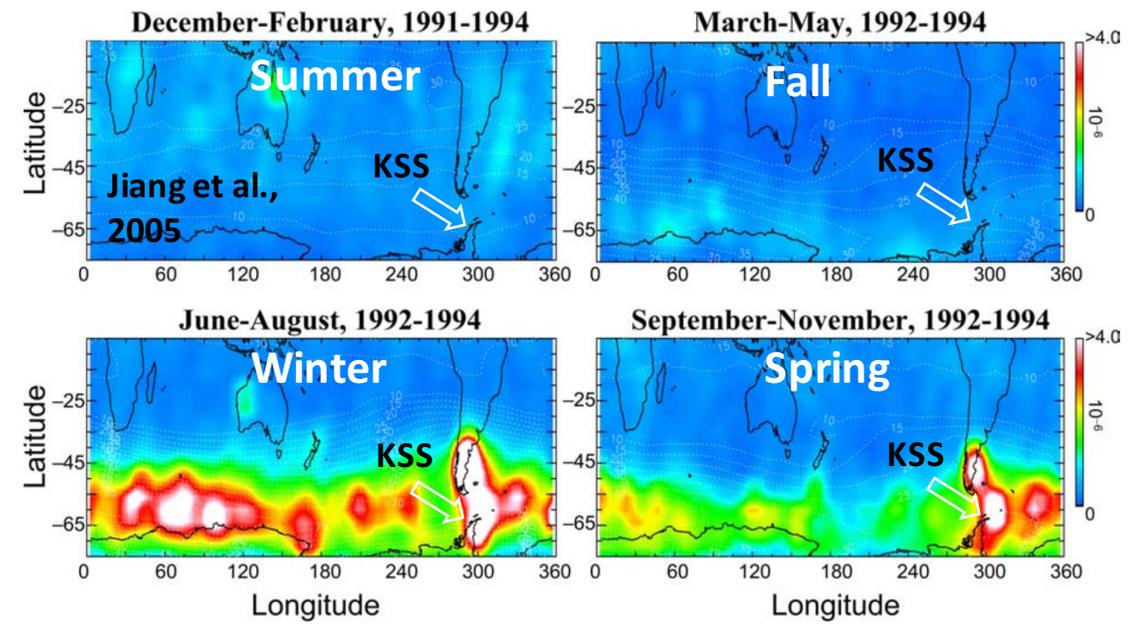
analysis...)



FMAM

Month June

JASO



RNBE (Residual of Nonlinear Balance Equation)
 - **Jet GW diagnosis index**
 - Averaged RNBE between [10hPa ~ 1hPa]
 - Resolution: 0.625° for lon, 0.5° for lat
 → Smoothing by 0.5° in lon

GWs generated from jet show larger at after mid-winter than before mid-winter, but *it can not be contributed as much as orographic source at June.*