학사 학위논문

전주시 겨울철 최심적설과 눈일수에 대한 전 지구적 메커니즘 분석

2021년 11월 19일

전북대학교 지구환경과학과
기후모델링연구실

오승관 윤난영 이민욱 이상학 임지영 조영표

학사 학위논문

전주시 겨울철 최심적설과 눈일수에 대한 전 지구적 메커니즘 분석

2021년 11월 19일

전 북 대 학 교 지 구 환 경 과 학 과
기 후 모 델 링 연 구 실

오승관 윤난영 이민욱 이상학 임지영 조영표

전주시 겨울철 최심적설과 눈일수에 대한 전 지구적 메커니즘 분석

지도교수 박종연

이 논문을 이학사 학위논문으로 제출함.

2021년 11월 19일

전 북 대 학 교 지 구 환 경 과 학 과
기 후 모 델 링 연 구 실

오승관 윤난영 이민욱 이상학 임지영 조영표

오승관, 윤난영, 이민욱, 이상학, 임지영, 조영표의 학사 학위논문을 인준함.

지도교수 박종연 (인)

2021년 11월 19일

전 북 대 학 교 지 구 환 경 과 학 과

목 차

List of Figures ---- 6

List of Tables ---- 8

【Abstract】 ---- 9

1. 서론 ---- 10

2. 연구방법 ---- 11

2-1. 연구 데이터 준비

2-2. 전주시 강설 메커니즘 통계분석

2-3. 모형 실험

3. 연구결과 ---- 13

3-1. Time Series

3-2. 회귀장 분석(Regression)

3-3. Linear Baroclinic Model(LBM)

4. 결론 및 고찰 ---- 43

5. REFERENCES ---- 44

List of Figures

Fig. 1. ---------- 13

Fig. 2. ---------- 14

Fig. 3. ---------- 16

Fig. 4. ---------- 18

Fig. 5. ---------- 20

Fig. 6. ---------- 22

Fig. 7. ---------- 23

Fig. 8.
---------- 25

Fig. 9.
---------- 27

Fig. 10.
---------- 29

Fig. 11.
---------- 31

Fig. 12.
---------- 32

Fig. 13.
---------- 34

Fig. 14.
---------- 36

Fig. 15.
---------- 37

Fig. 16.
---------- 39

Fig. 17.
---------- 41

Fig. 18.
---------- 42

List of Tables

Table. 1.
---------- 11

【Abstract】

전주시 겨울철 최심적설과 눈일수에 대한 전 지구적 메커니즘 분석

오승관 윤난영 이민욱 이상학 임지영 조영표

Climate Modeling 2021 Graduate Thesis

지도교수 : 박종연 교수님

전북대학교 지구환경과학과

최근 한반도 겨울철 강설 추세와 비슷하게 전주시 강설 또한 큰 변동을 겪고 있다. 이러한 전주시 강설 변동은 사회·경제적인 피해를 입히고 있어 정확한 원인 분석이 필요한 시점이다. 우리는 전주시 강설의 빈도나 강도가 심했던 계절에 초점을 두어 분석을 진행하였다. 해당 분석에 이용된 자료로는 전주기상지청의 1983 ~ 2021년 최심적설과 눈일수 그리고 전지구 격자화된 NOAA의 재분석 자료(Sea surface temperature, Wind vector, Air temperature, Geopotential height)를 활용하였다.

본격적인 메커니즘 파악을 위해 데이터 가공 후 3개월 이동평균된 자료를 가지고 회귀장 분석을 한 결과, 전주시 겨울철 최심적설과 엘니뇨 이벤트간의 연관성이 약 8개월 전부터 확인되었다. 그러나 눈일수에서는 ENSO와의 관계가 최심적설에 비해 상대적으로 약한 것으로 나타났다. 실제로 ENSO가 한반도에 영향을 미치는지 확인하기 위해 Linear Baroclinic Model(LBM)을 이용하여 선형화된 대기 흐름에서도 동일한지 비교해 보았으며, 그 결과 또한 ENSO와 전주시 겨울철 강설 기후 특성의 관계를 뒷받침해준다. 본 연구는 전주 지역 대설로 인해 발생할 수 있는 피해를 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

Key words : 최심적설, 눈일수, ENSO, 회귀장 분석, LBM

1. 서 론

현재 기후변화의 영향으로 인하여 대설발생이 증가하고 있다. 특히 북극의 해빙 범위 감소로 인하여 시베리아 등 북반구 지역에 눈과 구름의 분포가 증가하면서 우리나라를 포함한 고위도 북반구 지역의 기온이 떨어지고 대설과 같은 기상이변이 빈번하게 발생하는 추세를 보이고 있다. 실제로 2020년 10월 유라시아 대륙의 눈덮임 면적(Snow cover)이 평년보다 많았다. 2020년 이상기후 보고서에 따르면 이러한 눈덮임 면적의 증가로 인해 대륙이 급격하게 냉각되면서 시베리아 고기압이 강하게 발달하여 우리나라에 한파가 발생할 가능성이 높아진다고 설명한다(기상청, 2021)[1].

2020년 겨울에는 전라북도의 눈일수가 평년보다 4.2일 증가하였다. 특히 서~남서쪽으로 유입되는 따뜻한 공기가 북서쪽에서 남하하는 상층의 매우 찬 공기와 충돌하면서 눈구름대가 자주 발달하는 특징을 보였다(전주기상지청, 2021)[2]. 이러한 기후 변화에 따른 반응으로 나타날 가능성이 있는 폭설과 같은 기후 노출은 현재에는 강원권이 가장 취약한 것으로 나타나지만, 미래에는 강원권, 충청권, 호남권을 연결하는 축으로 취약지역이 점차 확대될 것으로 전망되며 이에 따라 국내에서의 이상기후에 대한 인식이 높아지고 있다(국토연구원, 2014)[3]. 현재까지 전라북도를 비롯한 호남지방의 강설 증가 추세와 대설 발생에 영향을 주는 전 지구적 기후 변화에 관한 연구결과가 많지 않다. 따라서 기후학적 측면뿐만 아니라 사회·경제적인 피해를 예방하기 위해서 미래 기후 변화와 이에 따른 전라북도 강설 특성 변화에 관한 중요성이 대두된다.

또한 1979~2011년, 북극진동지수 측면에서의 겨울철 남한지역 신적설과 최저 온도 특성에 관한 연구에서 지난 33년간 엘니뇨와 겨울철 한반도의 기온 및 강설 분포에 인과관계가 있음을 알 수 있다(노준우 et al, 2014)[4]. 2020년 8월에는 2018년 이후 처음으로 라니냐가 발생하였음에도 그 해 전주 지역에 대설이 내렸다. 따라서 현재 밝혀지지 않은 전주 지역 강설에 영향을 주는 기후 요인을 찾아 현재 북반구 대륙 규모의 강설 추세와 전주 지역의 강설 추세가 일치하는지 확인 하고, 라니냐 기간에 발생한 전주 지역 대설의 원인을 파악하기에 있어 이번 연구가 필요하다.

본 연구는 전주시 강설의 빈도(frequency) 및 강도(strength)가 심했던 겨울에 초점을 두어 진행하였다. 이를 위해 전주시 최심적설, 눈일수 데이터와 전 지구 규모에서 다양한 해양 및 대기 시스템 간의 통계학적 연관성을 분석하였다. 38년간의 전주시 최심적설, 눈일수 데이터와 전 지구 해양 및 대기 시스템 데이터인 해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST), 바람장(Wind vector), 기온(Air temperature), 지위 고도(Geopotential height) 및 해빙 농도(Sea ice concentration)에 대하여 회귀장 분석을 하여 두 변수 데이터의 유의미한 연관성 분석을 진행하였다. 앞서 선정한 전 지구 규모의 해양 및 대기 시스템에 의한 signal이 수개월에 걸쳐 전주 강설 분포에 영향을 줄 수 있음을 고려하여 강설 데이터와 함께 겨울철(12-2월) 평균으로 시작하여 0~12개월까지의 time lag를 두고 회귀장 분석을 하였다. 이를 통해 각각의 기후 변수들이 겨울철 전주 지역 강설 분포에 특정 signal로 나타나는지 파악하고자 한다.

2. 연구 방법

2-1. 연구 데이터 준비

본 연구에서는 전주시 겨울철 강설에 영향을 미치는 기후 특성을 분석하기 위해 1983~2021년, 총 38년간의 전주시 December ~ February의 월별 눈일수 및 일별 최심적설 관측 자료(https://data.kma.go.kr)를 DJF 평균(3개월 이동평균)으로 가공하여 Jeonju snow data로 사용한다. 또한, 기후변화를 확인할 수 있는 변수로써 전 지구 격자화된 NOAA의 재분석 자료(https://psl.noaa.gov/data/gridded/)인 Sea Surface Temperature (SST), Wind vector(u-wind, v-wind), Air temperature(850hPa), Geopotential height(850hPa), Sea ice concentration을 데이터로 사용한다. 이 데이터들에 대한 정의와 본 연구에 사용한 이유는 Table 1에 표현하였다[5].

분류	데이터	설 명
Jeonju snow data	눈일수 (Snowday)	기상현상 중 눈, 소낙눈, 가루눈, 눈보라, 소낙성진눈깨비, 진눈깨비, 싸락눈 중 어느 하나가 관측된 일수를 말하며, 관측자가 직접 관측한 현상일을 기준으로 한다.
	최심적설 (Snowdepth)	실제 지표면에 쌓인 눈의 최대 깊이를 말한다. 일반적으로 적설판을 사용하여 판의 면과 지면이 같아지도록 수평하게 설치해 두고 그 위에 쌓인 눈의 깊이를 자로 측정하며, 단위는 cm이다.
Observation reanalysis data	SST	Sea Surface Temperature (SST)는 해수 표층에서 관측되는 수온 또는 대기와 접해 있는 바다 표면의 온도를 의미하며, 단위는 ℃이다. 전 세계 해양의 열함량이 대기에 비해 방대하여 두 시스템의 상호작용 시 대기에 강력한 강제력을 줄 수 있는 잠재성을 지니기에 SST를 변수로 사용한다.
	Wind vector (u-wind, v-wind)	바람을 방향과 속도로 동시에 나타내기 위한 벡터로서, u-wind와 v-wind로 표현할 수 있다. 여기서 u-wind는 동서방향 바람을 나타내며, v-wind는 남북방향 바람이다. 단위는 m/s이고, 바람의 시공간적 분포는 대기 순환에 대한 정보를 제공하며 더 나아가 해수의 흐름 변화를 이끌 수 있어 Wind vector를 변수로 사용한다.
	Air temperature (850hPa)	850hPa에서의 대기 온도를 의미하며, 단위는 K이다. Air temperature는 Geopotential height와 마찬가지로 Seasonal dependence가 강하여 대기 변수의 계절 변동과 해륙 분포로 비롯되는 대기 하층의 온도가 맞물릴 수 있기 때문에 850hPa에서의 Air temperature를 변수로 사용한다.
	Geopotential height (850hPa)	850hPa에서의 지오포텐셜 고도를 나타낸 것이다. 여기서 지오포텐셜이란 어떤 높이의 공기 덩어리가 평균 해수면으로부터 가지는 위치에너지를 의미한다. 지오포텐셜 고도는 지오포텐셜을 중력가속도 $9.8m/s^2$로 나누어 정규화한 값이며, 단위는 m이다. Geopotential height는 전 지구적인 기압 배치를 나타내어 대기의 흐름을 파악할 수 있으며, 특히 대기 하층에서 Seasonal dependence로 인한 대기 변수의 계절 변동과 해륙 분포로 비롯되는 기압의 특성들이 맞물릴 수 있기 때문에 850hPa에서의 Geopotential height를 변수로 사용한다.
	Sea ice concentraion	북극의 해빙면적을 의미하며, 해빙의 양은 알베도, 수증기, Lapse-rate feedback에 영향을 주어 중위도의 대기 순환에 영향을 줄 수 있기 때문에 변수로 사용한다. 또한, 최근 지구온난화로 인해 감소하고 있는 해빙의 양에 의해 전주시 강설 또한 영향을 받았는지에 대해 연구하기 위해 사용한다.

Table. 1. 연구 데이터 목록. 전주시 겨울철 강설에 영향을 미치는 기후 특성을 분석하기 위한 연구 데이터이다. 이는 전주시 강설 자료인 Jeonju snow data와 기후 변화를 확인할 수 있는 변수인 Observation reanalysis data로 분류한다.

각각의 데이터들 중 SST의 Resolution은 x축(경도 격자) 360, y축(위도 격자) 180인데 반해, 나머지 Wind vector, Air temperature, Geopotential heigh, Sea ice concentration의 resolution은 144×73의 격자 공간을 지닌다. 또한, 각 데이터들은 변수 고유의 특성을 파악하기에 용이하도록 SST-Wind vector, Air temperature-Geopotential height와 같이 각각 두 세트로 묶어서 표현한다.

2-2. 전주시 강설 메커니즘 통계분석

본 연구에서는 전주시 강설 메커니즘 파악을 위해서 앞서 언급한 3개월(December ~ February) 이동평균된 전주시 강설자료들과 전주시 강설에 영향을 미칠 수 있는 변수간의 상관관계를 선형적으로 반영해줄 회귀분석(Regression)을 통계툴로서 사용한다. 기본적으로 0~12개월 Time lag된 전주시 강설자료(최심적설, 눈일수)를 인덱스로 사용하며, Observation reanalysis data 중 (Air temperature – Geopotential height, SST – Wind vector), 그리고 (Sea ice concentraion – Air temperature)를 따로 분류하여 각각 회귀분석을 진행한다. 여기서 회귀 분석이란 통계분석에서 두 변수 사이에 존재하는 구체적인 관계를 표현하는 방법으로, 한 변수를 통해 다른 변수를 예측하는 데 사용할 수 있는 방법이다. 주어진 데이터의 독립변수로 종속변수를 찾기 위해 데이터들을 가장 잘 설명할 수 있는 하나의 직선의 추세선을 찾는 것이 목적이다. 정확한 회귀장 분석은 식 (1)을 통해 이루어진다.

$$y = ax + b \quad \cdots\cdots (1)$$

- a : 회귀 계수(직선의 기울기)
- b : 절편
- x : 독립변수
- y : 종속변수

또한, 본 연구에서 회귀분석은 90%의 신뢰수준에서 유의성을 판단하기 위해 자기상관을 고려한 자유도를 사용하며 0~12개월동안 Time lag를 두어 표현한다. 여기에서 사용된 자유도는 식 (2)를 통해 이루어진다[6].

$$\text{Degree of freedom} = \frac{N}{\sum_{t=0}^{t=N-1}(1-\frac{t}{N})r_t^F r_t^O} \quad \cdots\cdots (2)$$

- N : 데이터 개수
- t : Time lag 변수
- r_t^F : 재분석자료의 자기상관계수
- r_t^O : 관측자료의 자기상관계수

전주시 강설이 실제로 많이 왔는지 혹은 적게 왔는지를 판단하기 위한 기준으로서 표준편차를 사용하며, 전주시 최심적설 및 눈일수 Time series에서 One standard deviation을 넘는 것이 Regression에 대해 더 기여도가 높다고 할 수 있다.

2-3. 모형 실험

본 연구에서는 Regression을 통해 나온 전주시 겨울철 강설의 기후 특성을 Linear Baroclinic Model(LBM)에 적용시켜 선형화된 대기 흐름에서도 동일한지 비교한다.

Atmospheric General Circulation Models(AGCMs)와 같은 비선형기후 모형은 현재의 기후를 시뮬레이션하고 이해하는 데 효율적이기 때문에 최근 점점 더 현실적인 모형이 되고 있다. 하지만 이러한 비선형기후 전 지구 모형은 보다 많은 역학 과정들과 모수화의 집합체이기 때문에 철저한 분석 없이는 해석이 어렵다는 단점이 있다.

반면에 LBM은 비선형기후 모형과 달리 원시방정식의 선형화된 대기 모형으로서, 프로세스 상에서 비선형성을 제거하여 복잡한 대기를 단순화시킨 것이다. 또한 이 모형은 비단열 가열 아노말리나 해수면 온도 아노말리에 대한 대기 순환장의 변화를 모의하는 간단한 전 지구 역학 모형이다. 수평적으로는 T42 가우시안 격자(Gaussian grid)를 가지고 20개의 시그마 좌표(Sigma coordinate) 연직층을 가진다[7]. 따라서 LBM은 결과를 쉽게 해석할 수 있다는 장점이 있으며, LBM과 같은 선형화된 대기 모형은 대규모 대기 순환에 있어서 다양한 측면을 조사하는 데 유용하다 (https://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~lbm/sub/lbm.html).

3. 연구 결과

3-1. Time Series

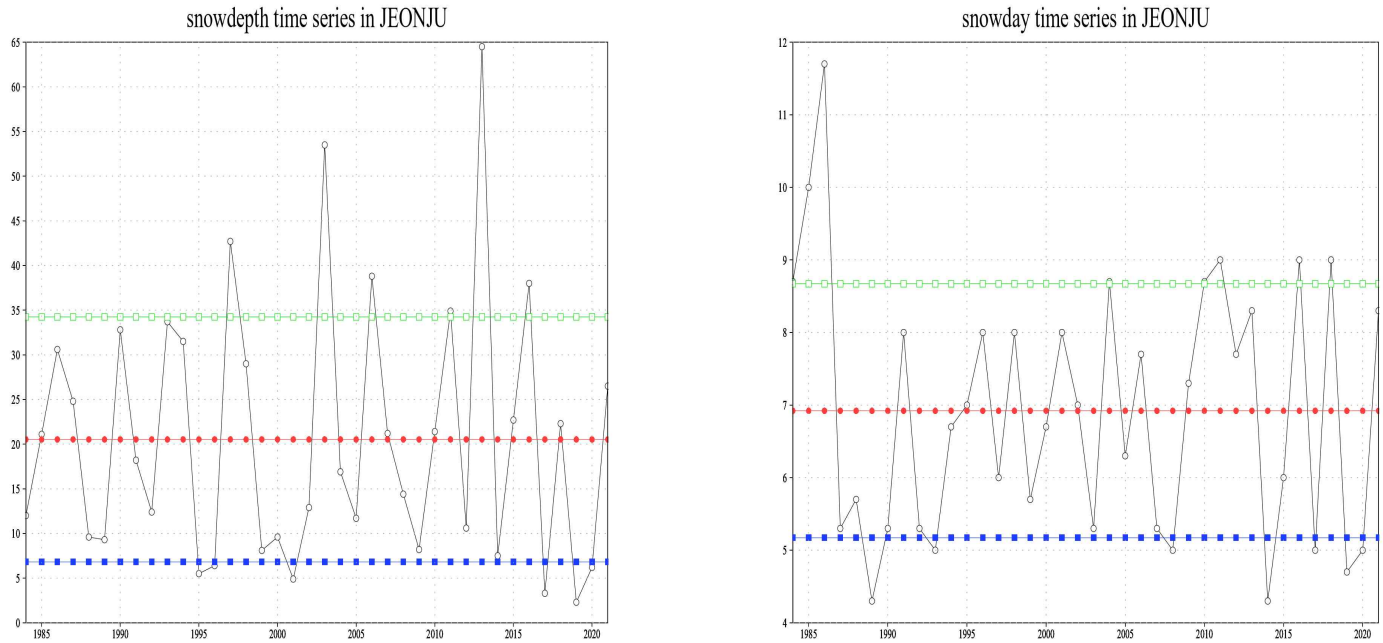


Fig. 1. 전주시 겨울철(DJF 3개월 이동평균) 강설자료(최심적설, 눈일수) Time series

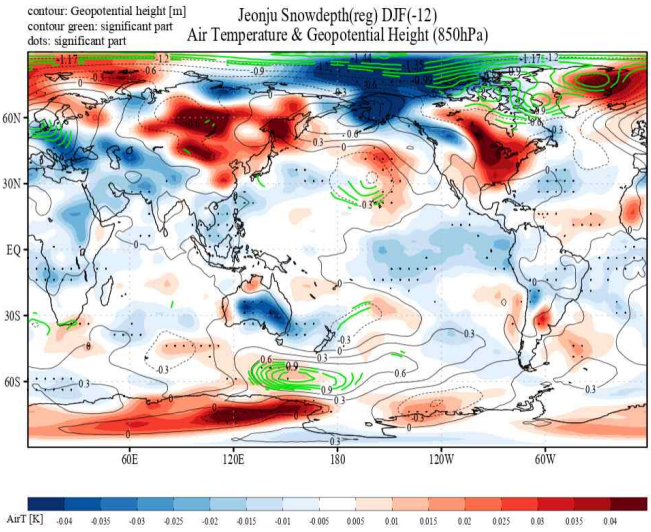
Fig. 1에서 알 수 있듯이 1983년부터 2021년까지 38년치의 전주시 겨울철(DJF 3개월 이동평균) 강설자료를 Time series로 나타낸 결과 2020년 12월, 2021년 1월과 2월의 평균 최심적설과 눈일수는 평균을 살짝 웃도는 것으로 나타났다. Fig. 1의 초록색 선은 평균 + 표준편차, 빨간색 선은 평균, 파란색 선은 평균 - 표준편차를 의미한다.

3-2. 회귀장 분석(Regression)

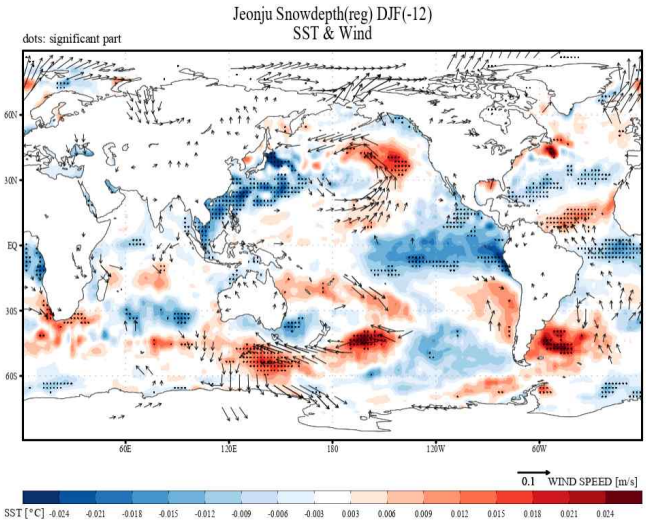
3-2-1. Air temperature - Geopotential height, SST - Wind vector(Snowdepth)

3-2-1-1. DJF(-12), JFM(-11), FMA(-10)

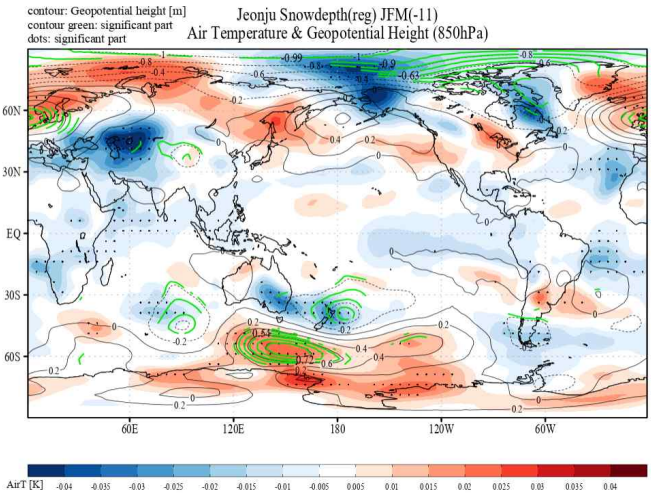
(a)



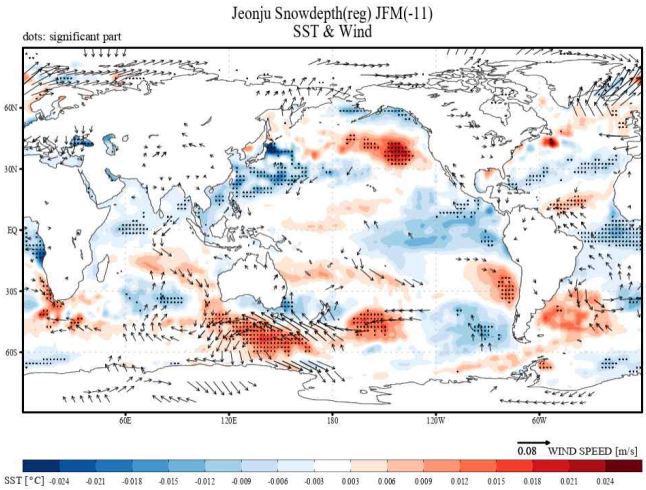
(d)



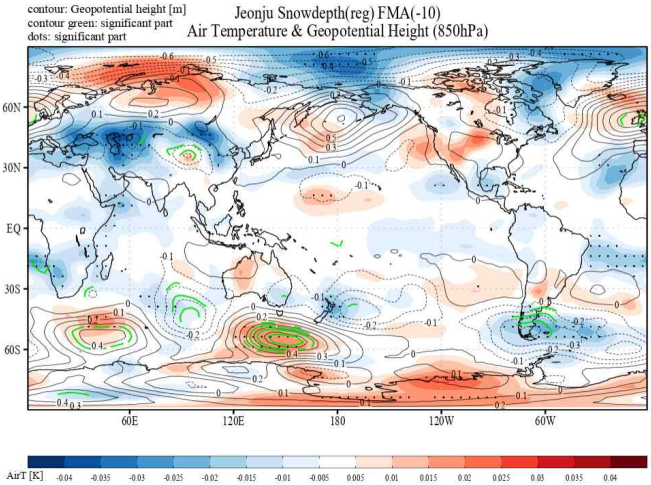
(b)



(e)



(c)



(f)

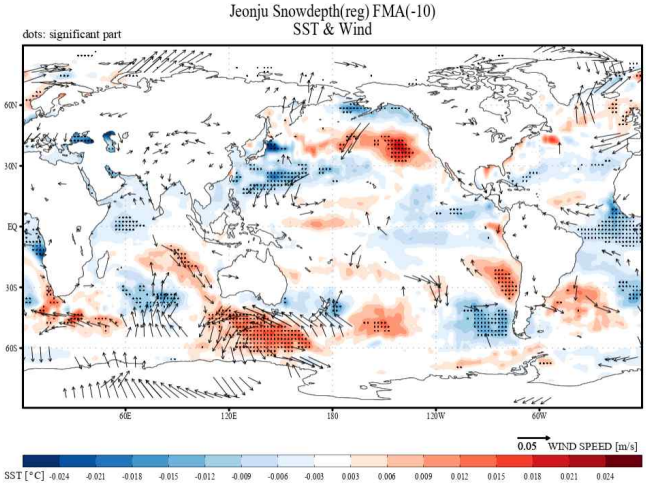


Fig. 2. 10~12개월 전 전주시 적설량과 기후변수간의 회귀장. (a-c) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (d-f) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

Fig. 2. (a)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 남극, 아르헨티나 남동부, 북태평양 동부, 대서양 중부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북극, 남아프리카 북부, 남아메리카 중부, 남대서양과 북대서양 중부, ENSO 지역에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 2. (d)에서 SST & Wind vector에서는 호주 남부, 칠레 서부, 북태평양 동부, 대서양 중부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북태평양 서부, 아프리카 서부, 인도양 남부, 북대서양 중부, 브라질 동부, ENSO 지역에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 북태평양에서 저기압성 회전을 보여준다.

Fig. 2. (b)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 남극과 남극해, 영국 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 중앙아시아, 중남부 아프리카, 인도양, 호주 동남부 및 뉴질랜드 북부, 브라질 동부, 스페인 서부, 알래스카 북부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 2. (e)에서 SST & Wind vector에서는 호주 남부, 칠레 서부, 북태평양 동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 남부, 아프리카 서부, 인도양 남부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 호주 남부에서 고기압성 회전을 보인다.

Fig. 2. (c)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 마다가스카르 남부와 남극, 중앙태평양에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 중앙아시아, 동아시아, 북극 뉴질랜드 북부, 브라질 동부, 아르헨티나 남동부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

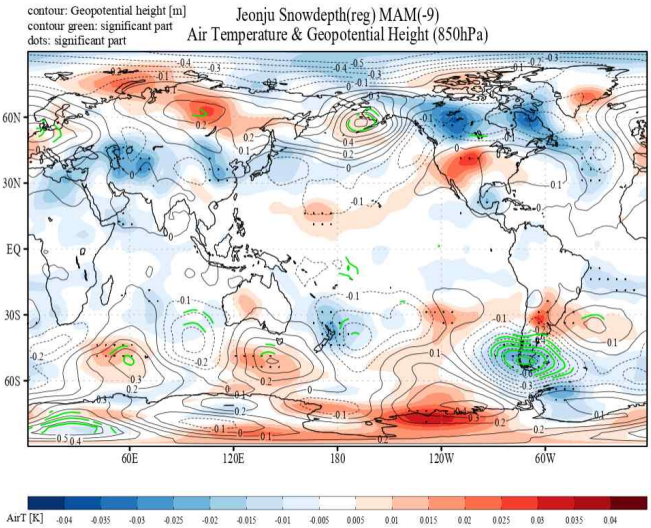
Fig. 2. (f)에서 SST & Wind vector에서는 호주 남부와 서북부, 칠레 서부, 북태평양 동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 남부, 아프리카 서부, 인도양 남부, 남아메리카 남서부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 호주 남부에서 고기압성 회전을 보인다.

Fig. 2. Air temperature & Geopotential height의 3개월 추세에서 positive anomaly는 남극 일대에 위치하고 있으며 호주남부의 세기가 강해지고 있다. 미국의 signal이 약해졌다. negative anomaly는 알레스카 일대와 북극과 서아시아, 호주 동부 해역에서는 약해졌음이 보인다.

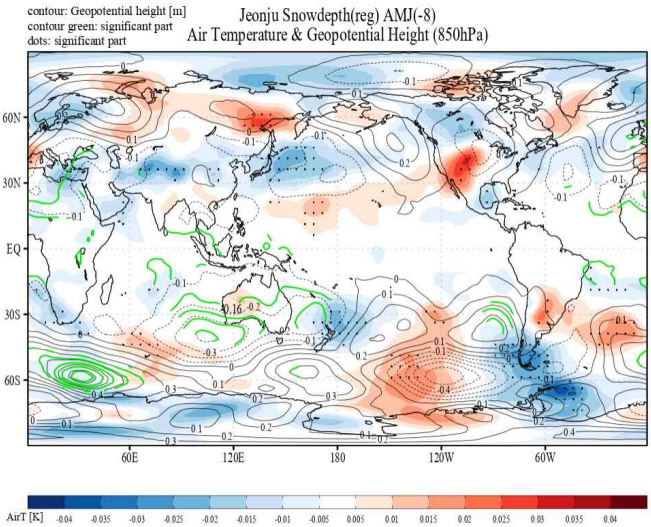
SST & Wind vector의 3개월 추세에서 전반적인 위치는 유사하나 호주남부의 positive anomaly의 세기가 강해지고 있으며 인도양 남부와 칠레 서쪽의 negative anomaly의 영역이 확장되는 것이 보인다. ENSO의 positive anomaly가 나타나고 있음을 볼 수 있다. 바람장은 호주 남부에서 고기압성 회전이 2개월간 유지됨을 보인다.

3-2-1-2. MAM(-9), AMJ(-8), MJJ(-7)

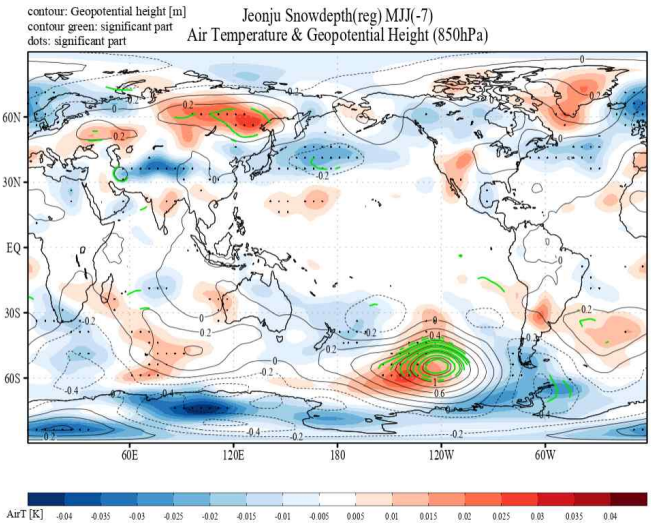
(a)



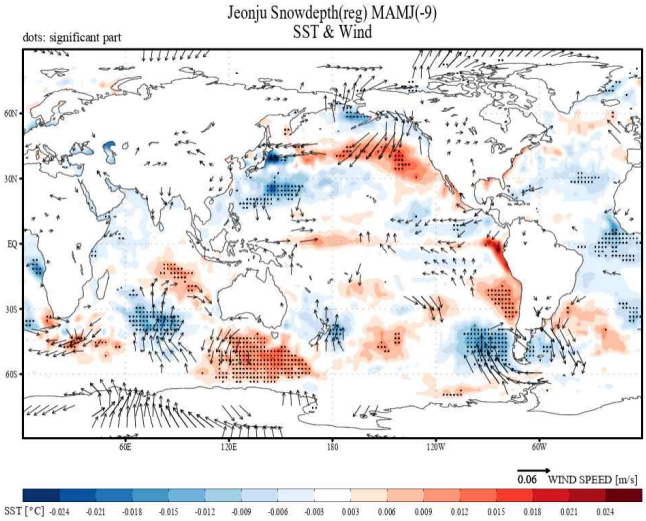
(b)



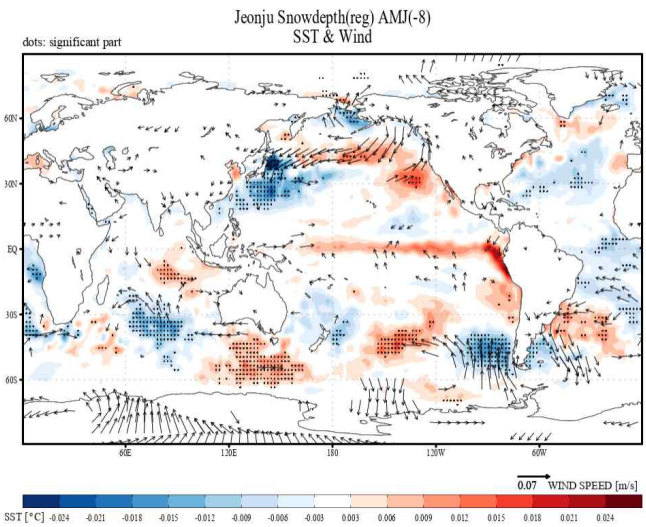
(c)



(d)



(e)



(f)

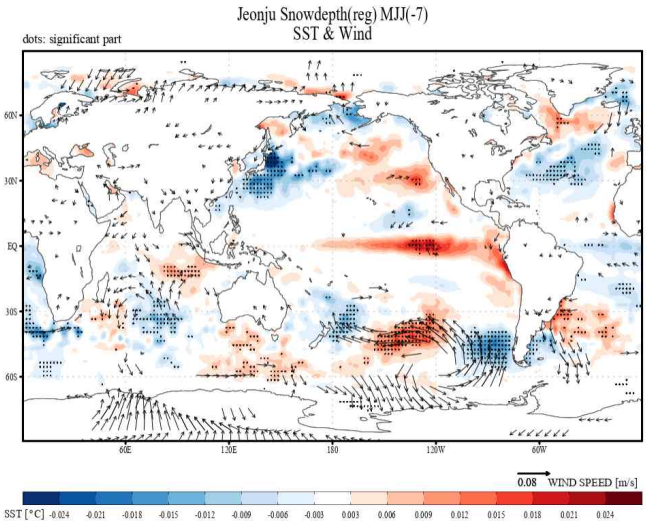


Fig. 3. 7~9개월 전 전주시 적설량과 기후변수간의 회귀장. (a-c) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (d-f) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

Fig. 3. (a)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 마다가스카르 남부와 남극, 중앙태평양, 미국 중북부, 남아메리카 중남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 중앙아시아, 동아시아, 캐나다 서부, 뉴질랜드 북부, 브라질 동부, 북대서양에서 유의한 negative anomal가 나왔다.

Fig. 3. (d)에서 SST & Wind vector에서는 호주 남부와 서북부, 칠레 서부, 북태평양 동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 남부, 대서양 전역, 인도양 남부, 남아메리카 남서부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 알레스카에 고기압성 회전이 보인다.

Fig. 3. (b)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 마다가스카르 남동부와 남태평양 남부, 만주 남부, 중앙태평양, 미국 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 동부, 남아메리카 남부, 히말라야, 뉴질랜드 북부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 3. (e)에서 SST & Wind vector에서는 인도네시아 남서부, 남태평양 남부, 아르헨티나 동부, 호주 남부, 북태평양 북동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 동부와 남부, 대서양 전역, 인도양 남부, 남아메리카 남서부와 남동부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 북태평양에 동풍 계열의 바람이 불고 있다.

Fig. 3. (c)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 마다가스카르 남동부와 남태평양 남부, 시베리아, 일본 남동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 동북부, 미국 서부, 스칸디나비아 반도 서부, 히말라야에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

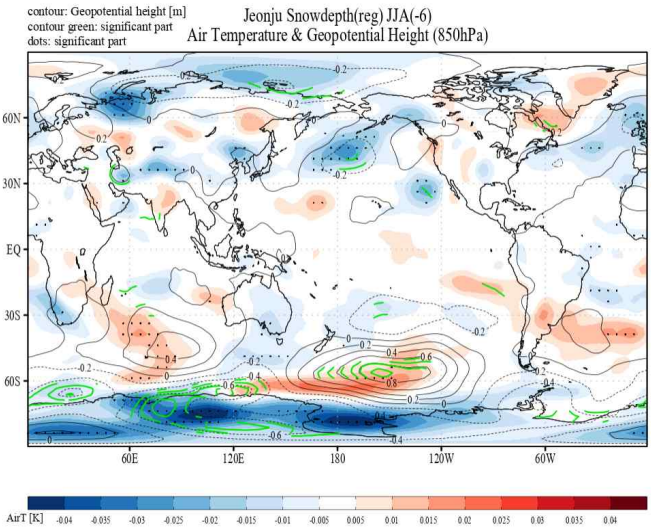
Fig. 3. (f)에서 SST & Wind vector에서는 인도네시아 남서부, 남태평양 남부, 아르헨티나 동부, 호주 남부, ENSO 지역에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 동부와 남부, 대서양 전역, 인도양 남부, 남아메리카 남서부와 남동부, 뉴질랜드 동북부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 3. Air temperature & Geopotential height의 3개월 추세에서 전반적인 위치는 유사하다. positive anomaly는 시베리아, 남태평양 일대에 세기가 강해지고 있다. 미국과 아르헨티나, 남대서양의 signal이 강해졌다. negative anomaly는 남극 일대에서 signal이 약해졌으며 남아메리카 남부에서는 강해졌다 약해지는 것이 보인다.

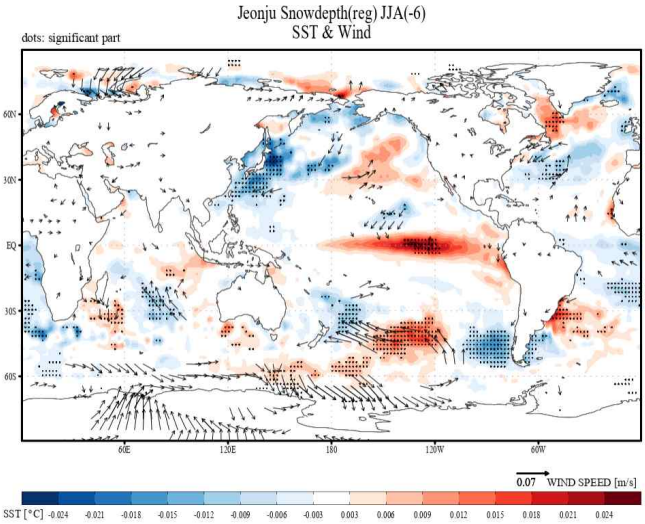
SST & Wind vector의 3개월 추세에서 전반적인 위치는 유사하나 호주남부의 positive anomaly의 영역이 줄어들고 있으며 인도양 남부의 negative anomaly의 영역이 유지지는 것이 보인다. ENSO의 positive anomaly가 점차 줄어들고 있음을 볼 수 있다. 바람장은 남태평양에서 고기압성 회전이 2개월간 유지 되고 있음을 볼 수 있다.

3-2-1-3. JJA(-6), JAS(-5), ASO(-4)

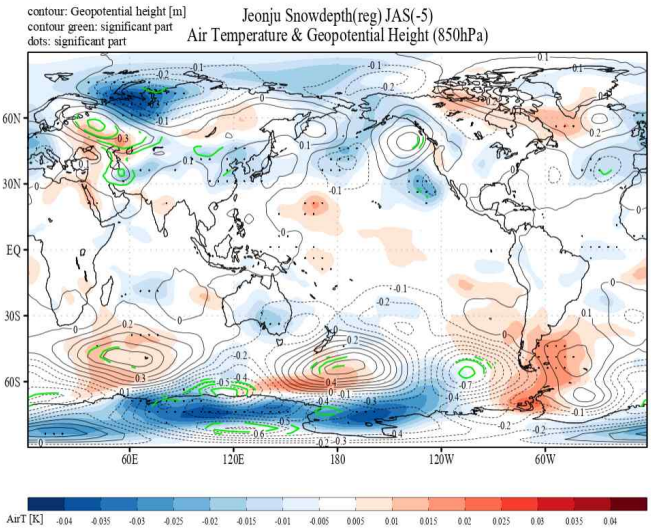
(a)



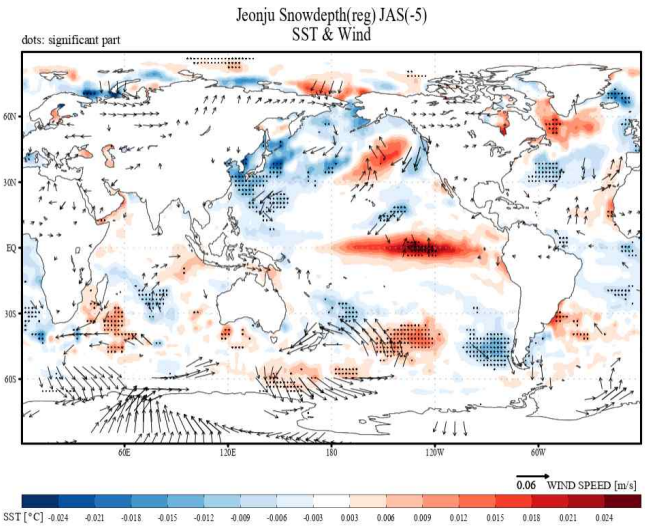
(d)



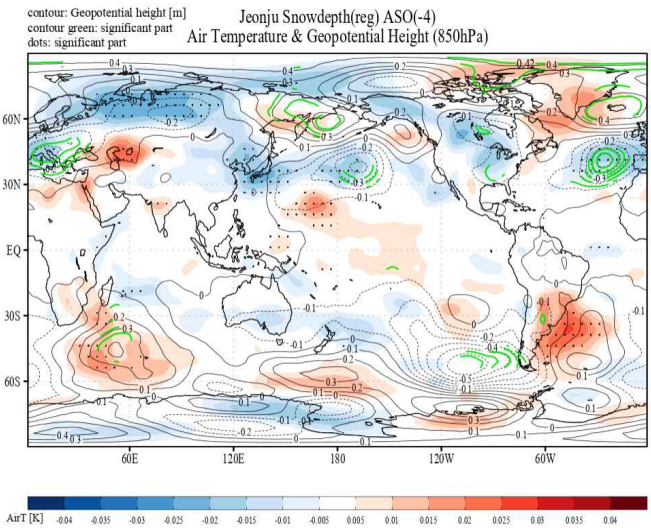
(b)



(e)



(c)



(f)

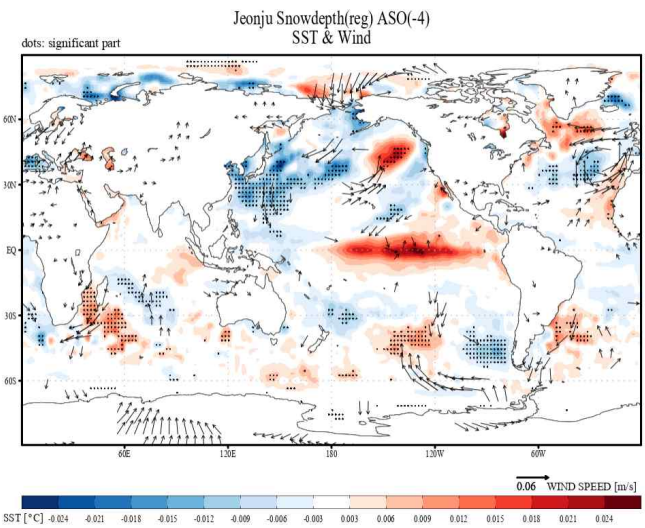


Fig. 4. 4~6개월 전 전주시 적설량과 기후변수간의 회귀장. (a-c) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (d-f) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

Fig. 4. (a)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 마다가스카르 남부와 남태평양 남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북태평양 북부 미국 서부, 콜라 반도 동부, 히말라야에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 4. (d)에서 SST & Wind vector에서는 마다가스카르 남부, 남태평양 남부, 아르헨티나 동부, 그린란드 남부, ENSO 지역에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 동부와 남부, 미국 동부, 남아메리카 남서부와 남동부, 뉴질랜드 동북부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 4. (b)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 아르헨티나 동남부, 중앙태평양에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 동북아시아와 러시아 북부, 북태평양 중앙에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 4. (e)에서 SST & Wind vector에서는 마다가스카르 동남부, 남태평양 남부, 아르헨티나 동부, 그린란드 남부, ENSO 지역에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 동부와 남부, 미국 동부, 칠레 남서부, 뉴질랜드 동북부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 뉴질랜드 남동쪽에 고기압성 회전이 보인다.

Fig. 4. (c)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 중앙태평양 서부, 아르헨티나 동부, 남아프리카 동남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 동북아시아와 러시아 북부, 스페인 서부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

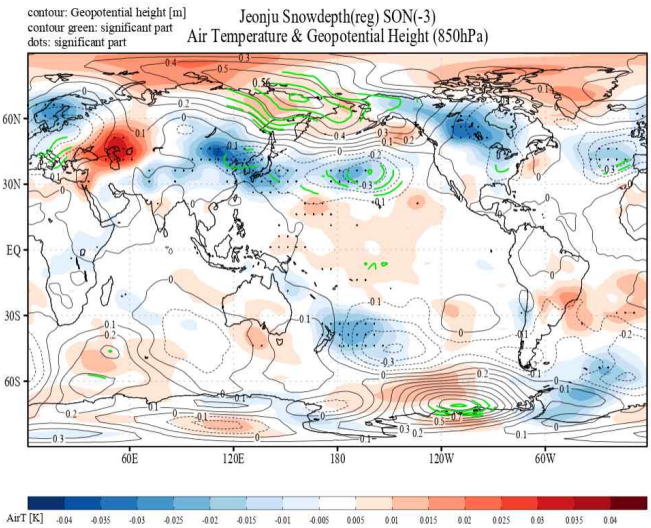
Fig. 4. (f)에서 SST & Wind vector에서는 캐나다 서부와 남아프리카 동부, 남태평양 남부, 아르헨티나 동부, 그린란드 남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북태평양 서부 일대와 북대서양, 칠레 남서부, 뉴질랜드 동부, 지중해에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 대서양에 저기압성 회전이 보인다.

Fig. 4. Air temperature & Geopotential height의 3개월 추세에서 전반적인 위치는 유사하나 positive anomaly의 세기가 강해짐을 알 수 있다. positive anomaly는 흑해 일대와 아르헨티나의 signal이 강해졌다. negative anomalys는 동아시아 일대에서 signal이 강해졌으며 남극에서는 약해졌음이 보인다.

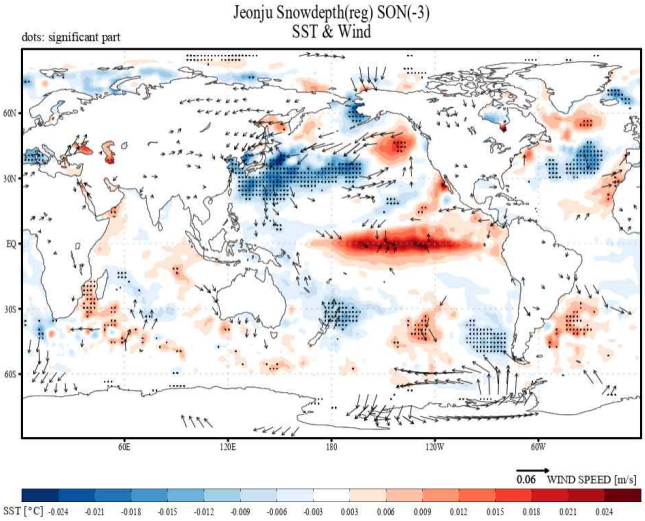
SST & Wind vector의 3개월 추세에서 전반적인 위치는 유사하나 일본과 동중국해의 negative anomaly의 영역이 늘어나고 있으며 북태평양의 positive anomaly는 강해지는 것이 보인다. ENSO의 positive anomaly가 유지됨을 볼 수 있다.

3-2-1-4. SON(-3), OND(-2), NDJ(-1)

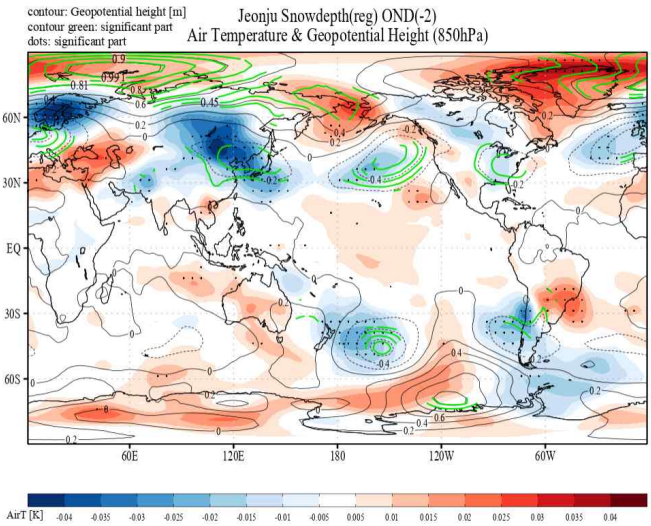
(a)



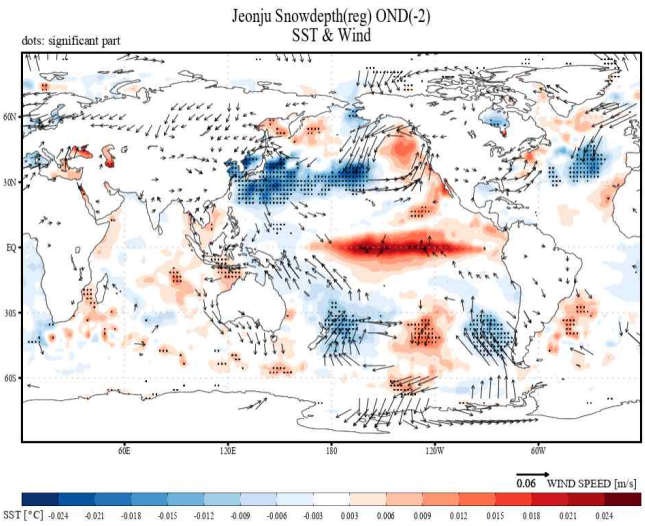
(d)



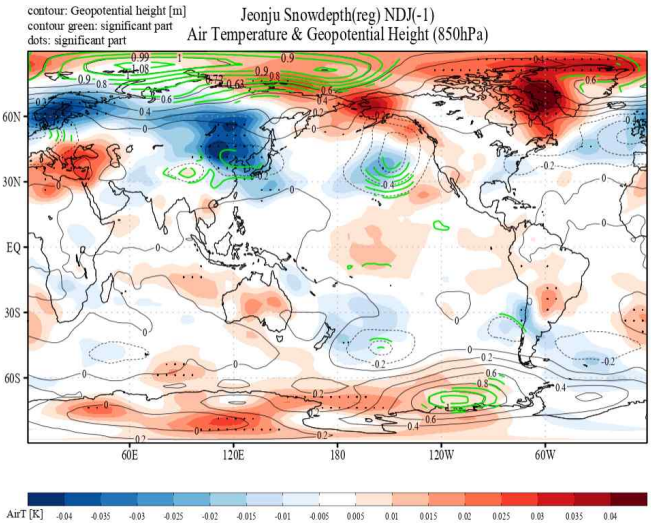
(b)



(e)



(c)



(f)

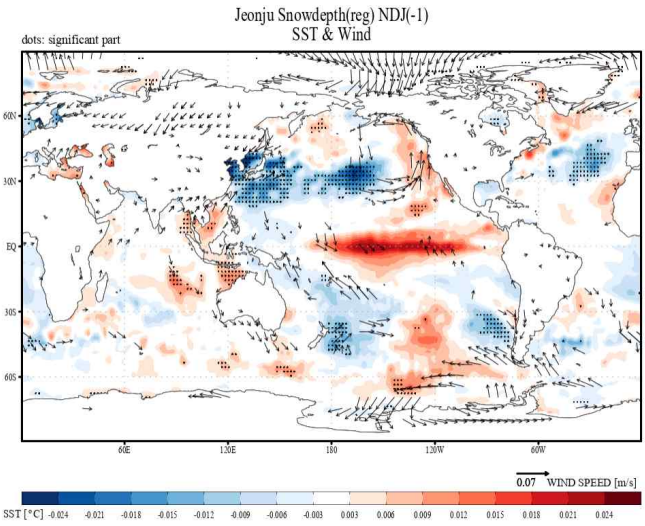


Fig. 5. 1~3개월 전 전주시 적설량과 기후변수간의 회귀장. (a-c) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (d-f) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

Fig. 5. (a)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 중앙태평양 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 동북아시아와 북유럽, 뉴질랜드 동부, 캐나다에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 5. (d)에서 SST & Wind vector에서는 캐나다 남서부와 남아프리카 동부, 남태평양 남부, 아르헨티나 동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북태평양 넓은 지역과 북대서양, 칠레 남서부, 뉴질랜드 동부, 지중해에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 북태평양에 저기압성 회전이 보인다.

Fig. 5. (b)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 그린란드 서북부와 베링 해협 남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 동북아시아와 북유럽, 뉴질랜드 동부, 칠레 남서부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 5. (e)에서 SST & Wind vector에서는 멕시코 서부와 호주 서북부, 남태평양 남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북태평양 넓은 지역과 북대서양, 칠레 남서부, 뉴질랜드 동부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 미국 서부에 저기압성 회전이 보인다.

Fig. 5. (c)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 그린란드 서북부와 남극, 남아메리카 중남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 동북아시아와 북유럽에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

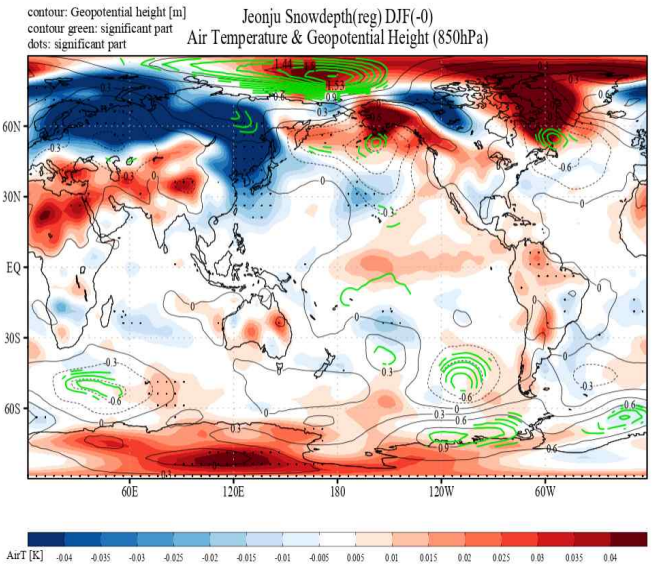
Fig. 5. (f)에서 SST & Wind vector에서는 멕시코 서부와 호주 서북부, 남극해에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북태평양 넓은 지역과 북대서양, 칠레 남서부, 뉴질랜드 동부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 한반도에 남서풍 계열 바람이 유입됨을 알 수 있다.

Fig. 5. Air temperature & Geopotential height의 3개월 추세에서 전반적인 추세는 전반적인 위치는 유사하나 signal의 세기가 강해짐을 알 수 있다. positive anomaly는 그린란드와 남극의 signal이 강해졌다. negative anomaly 또한 동아시아 일대에서 signal이 강해졌음이 보인다.

SST & Wind vector의 3개월 추세에서 전반적인 위치는 유사하나 일본과 동중국해의 negative anomaly가 유지되고 있으며 북태평양의 positive anomaly는 약해지는 것이 보인다. ENSO의 positive anomaly가 약해짐을 볼 수 있다. 바람장은 북극의 고기압성 회전이 강해지고 있음을 볼 수 있다.

3-2-1-5. DJF(-0)

(a)



(b)

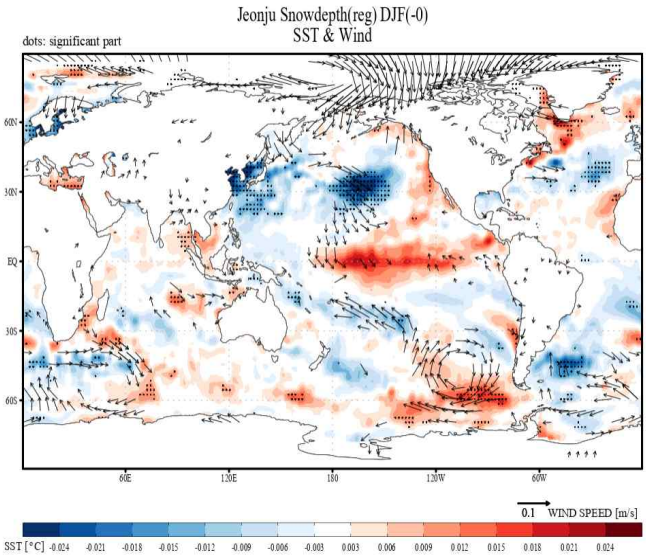


Fig. 6. 0개월 전 전주시 적설량과 기후변수간의 회귀장. (a) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (b) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

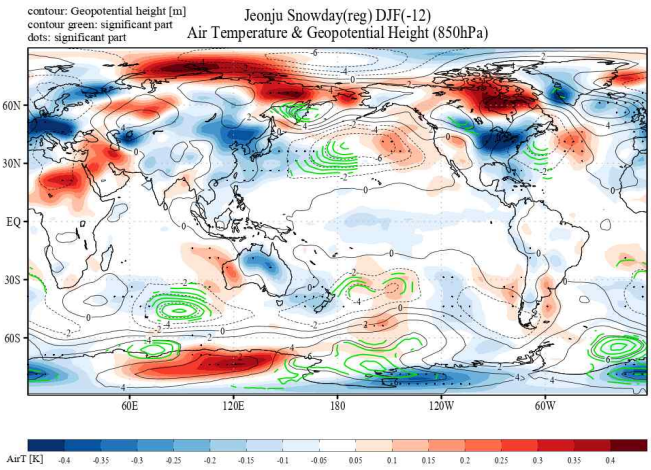
Fig. 6. (a)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 그린란드 서부와 남극, 남아메리카 북부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 동북아시아와 북유럽에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 6. (b)에서 SST & Wind vector에서는 칠레 남서부와 그린란드 남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북태평양과 동북아시아, 북유럽, 아르헨티나 동남부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 북극에서 고기압성 회전이 보이며 칠레 남서부 해역에 저기압성 회전이 보인다.

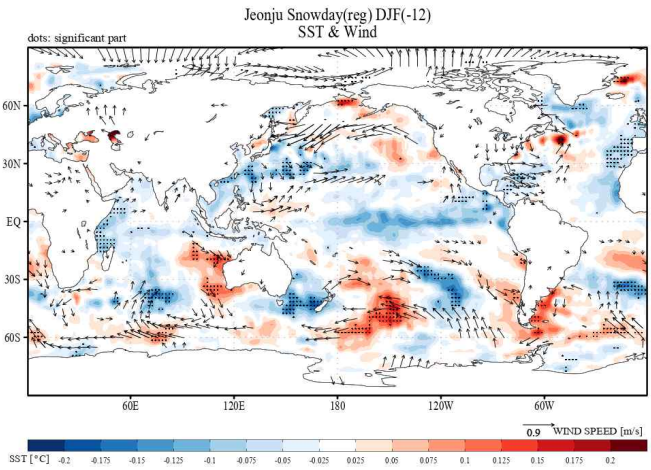
3-2-2. Air temperature - Geopotential height, SST - Wind vector(Snowday)

3-2-2-1. DJF(-12), JFM(-11), FMA(-10)

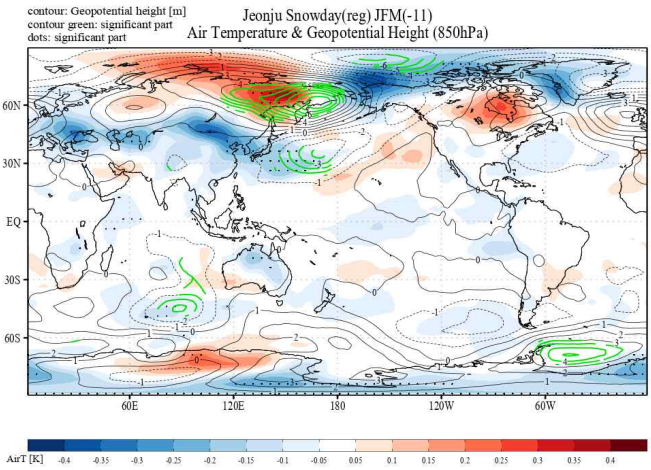
(a)



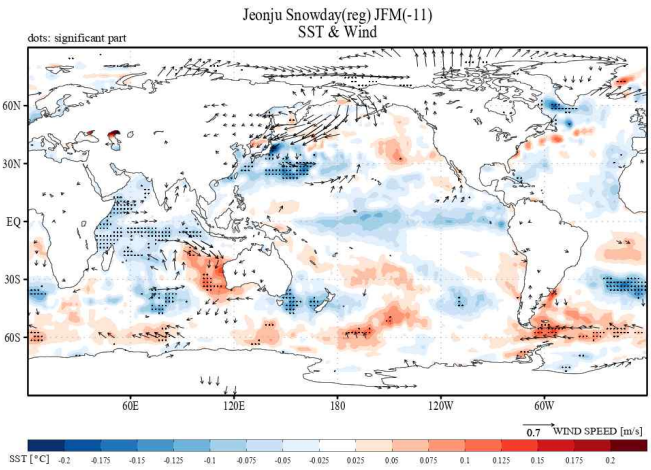
(d)



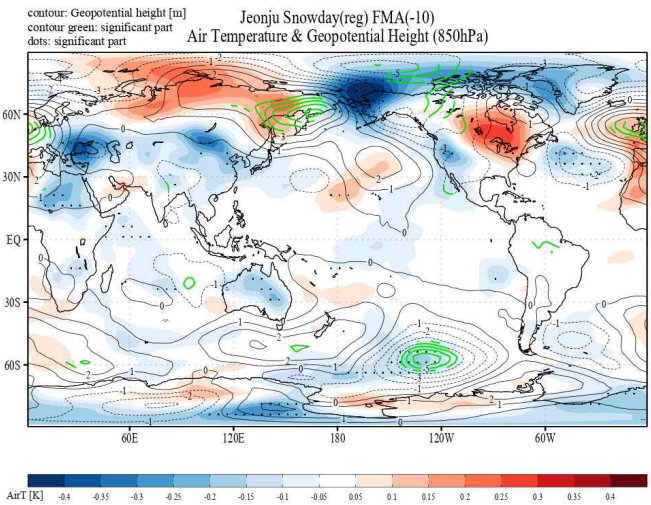
(b)



(e)



(c)



(f)

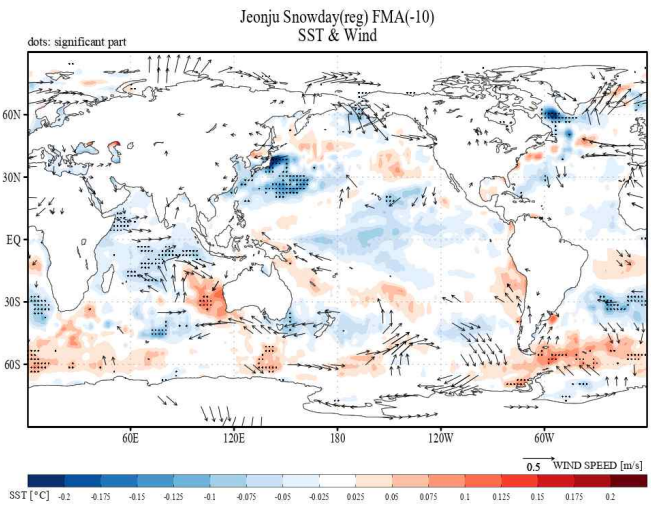


Fig. 7. 10~12개월 전 전주시 눈일수와 기후변수간의 회귀장. (a-c) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (d-f) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

Fig. 7. (a)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 캐나다 동부와 남극, 러시아 동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 남동부, 미국 동부, 남극, 유럽에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 7. (d)에서 에서는 아르헨티나 동남부와 호주 서부, 남태평양 남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 호주 동남부와 일본 동남부, 중앙아프리카 동부, 중앙아메리카 서부 및 인도양 남부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 북태평양에 저기압성 회전이 보이며 전반적으로 풍속이 강해졌다.

Fig. 7. (b)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 러시아 동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 일본 남동부, 알레스카 북부, 남극에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 7. (e)에서 에서는 아르헨티나 동남부와 호주 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 호주 동남부와 일본 동남부, 중앙아프리카 동부, 남태평양 일대에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 북태평양에 저기압 회전이 보인다.

Fig. 7. (c)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 유의한 positive anomaly가 나오지 않았으며 북대서양, 호주, 리비아 남부, 남극해 및 남극에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

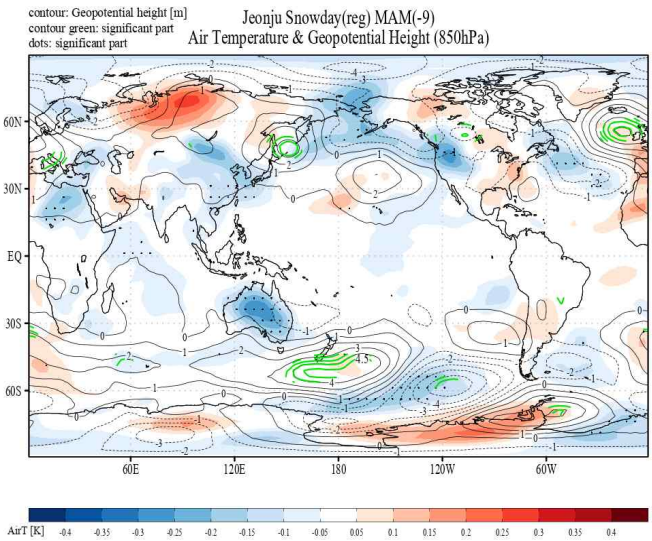
Fig. 7. (f)에서 에서는 남대서양 남부와 호주 서부 및 남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 캐나다 동부와 일본 남부, 인도 남부, 소말리아 동부, 남아프리카 서부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 한반도에 동풍계열의 바람이 불고 있는 것이 보인다.

Fig. 7. Air temperature & Geopotential height의 3개월 추세에서 전반적인 추세는 Fig. 7. (b)에선 signal이 약하다 Fig. 7. (c)에서 signal이 강해짐을 알 수 있다. positive anomaly는 2개월간 러시아 동부에서 유지되다 사라졌다. negative anomaly는 호주 일대에서는 유지가 되었으나 남극해 일대, 일본 동부 해역의 signal이 점차 약화 되었으며 알레스카 북부, 남극의 signal이 강화되는 것이 보인다.

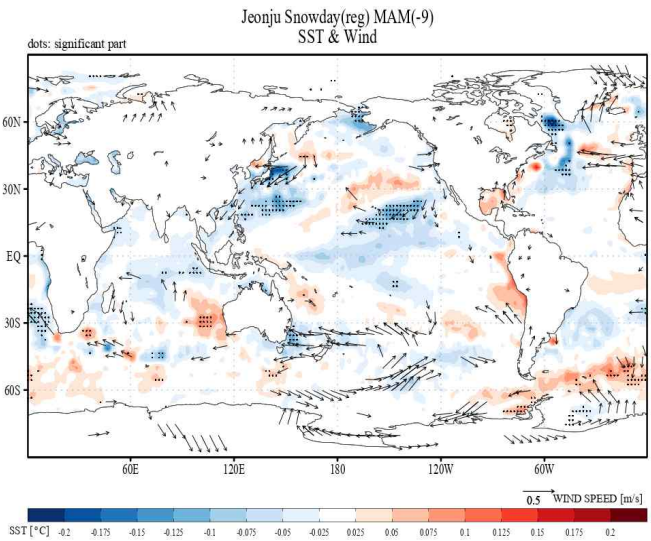
SST & Wind vector의 3개월 추세에서 일본과 동중국해의 negative anomaly가 유지되고 있으며 인도남부와 아프리카 동부의 negative anomaly와 아르헨티나 동남부의 positive anomaly가 나타났다. 바람장은 뉴질랜드 동남쪽 부근의 고기압성 회전이 점차 나타나고 북태평양에 저기압성 회전이 사라짐을 볼 수 있다.

3-2-2-2. MAM(-9), AMJ(-8), MJJ(-7)

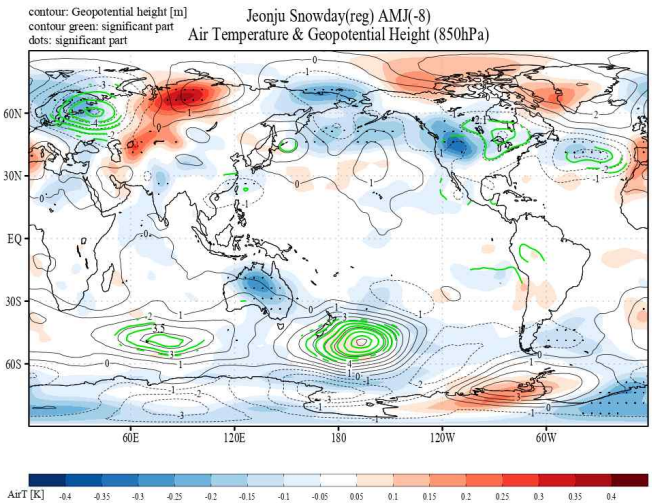
(a)



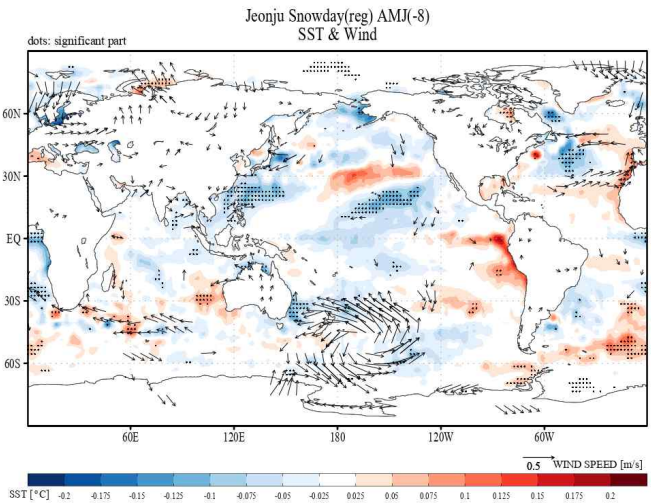
(d)



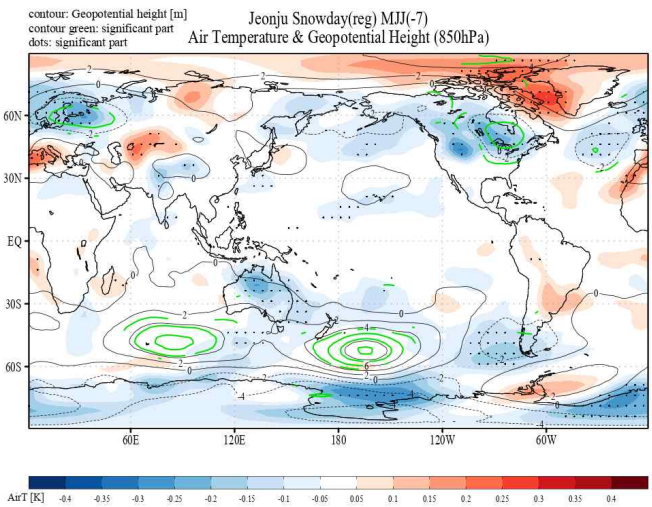
(b)



(e)



(c)



(f)

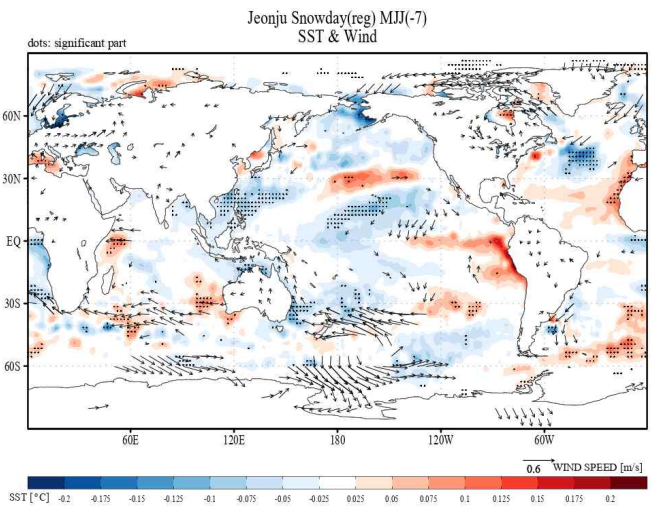


Fig. 8. 7~9개월 전 전주시 눈일수와 기후변수간의 회귀장. (a-c) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (d-f) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

Fig. 8. (a)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 유의한 positive anomaly가 나오지 않았으며 호주, 남극해에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 8. (d)에서는 남대서양 남부와 호주 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 캐나다 동부와 하와이 근방 해역, 일본 남부와 호주 동남부, 남아프리카 서부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 한반도에 동풍계열의 바람이 불고 있으며 뉴질랜드 남쪽 해역에 고기압성 회전이 보인다.

Fig. 8. (b)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 우랄산맥 동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 미국 서부, 호주, 러시아 동부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 8. (e)에서는 남대서양 남부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북대서양과 중앙태평양, 필리핀 북부와 호주 동남부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 뉴질랜드 남동쪽 부근에서 고기압성 회전이 보인다.

Fig. 8. (c)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 그린란드 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 남극과 북대서양, 스칸디나비아반도, 북미 대륙에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

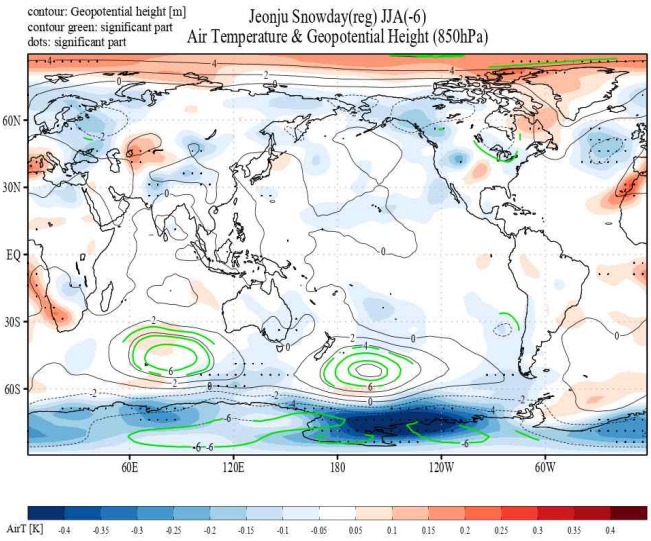
Fig. 8. (f)에서는 소말리아 동남부와 마다가스카르 남부, 서사하라 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북대서양과 중앙태평양, 필리핀 북부와 뉴질랜드 동북부, 호주 동남부에서 유의한 negative anomaly이 나왔다. 바람장은 캐나다 동부에서 저기압성 회전이 뉴질랜드 남동쪽에서 고기압성 회전이 보인다.

Fig. 8. Air temperature & Geopotential height의 3개월 추세에서 전반적인 추세는 Fig. 8. (a), Fig. 8. (b)까지 비슷하다가 Fig. 8. (c)에서 바뀜을 볼 수 있다. positive anomaly는 그린란드의 signal이 강해지고 있으며 우랄산맥 동부의 signal이 사라지고 있다. negative anomaly는 남극해 일대의 signal이 점차 약화 되었으며 미국 서부에 signal이 강화되는 것이 보인다.

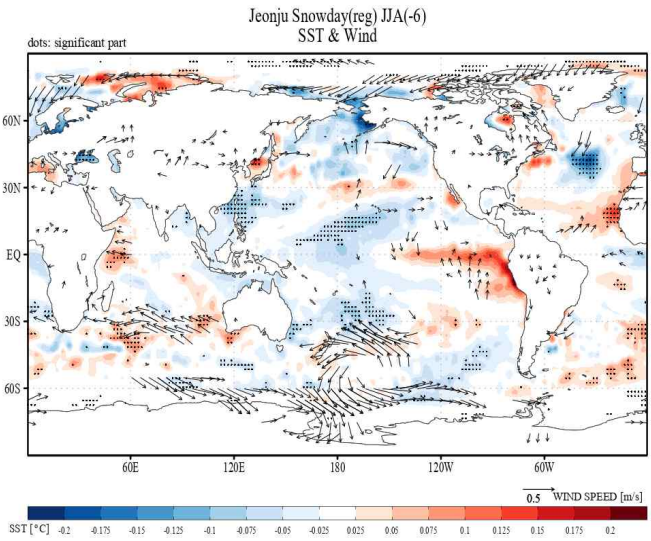
SST & Wind vector의 3개월 추세에서 큰 변화 없이 중앙 태평양, 동중국해, 북대서양의 negative anomaly가 유지되고 있으며 뉴질랜드 동남쪽 부근의 고기압성 회전이 유지되고 있음을 볼 수 있다.

3-2-2-3. JJA(-6), JAS(-5), ASO(-4)

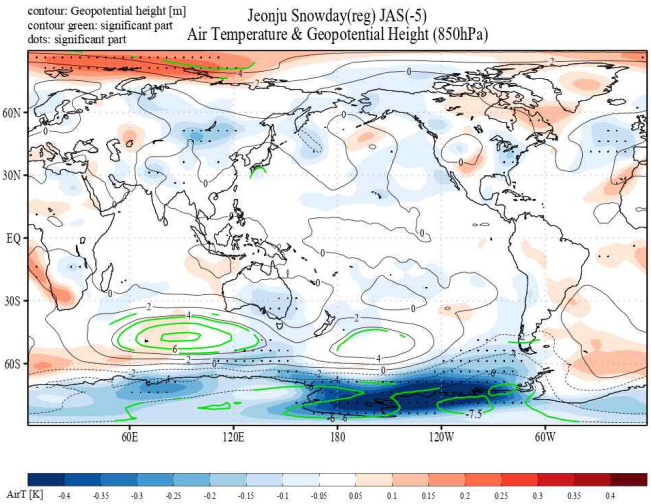
(a)



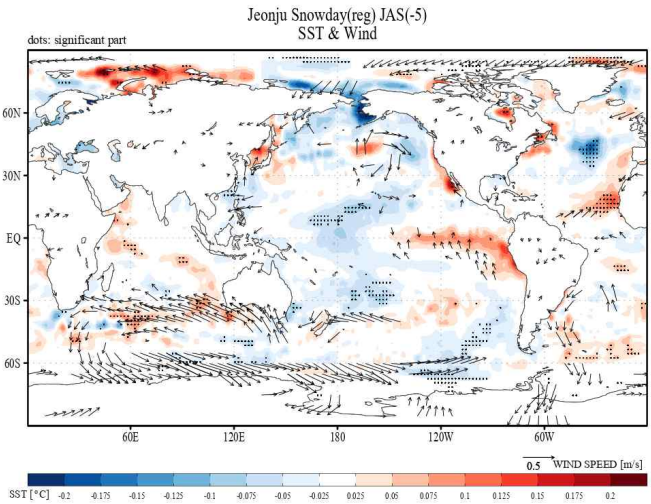
(d)



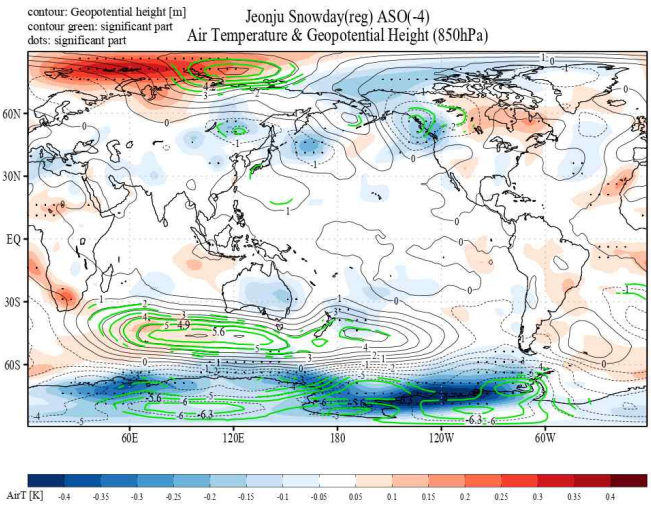
(b)



(e)



(c)



(f)

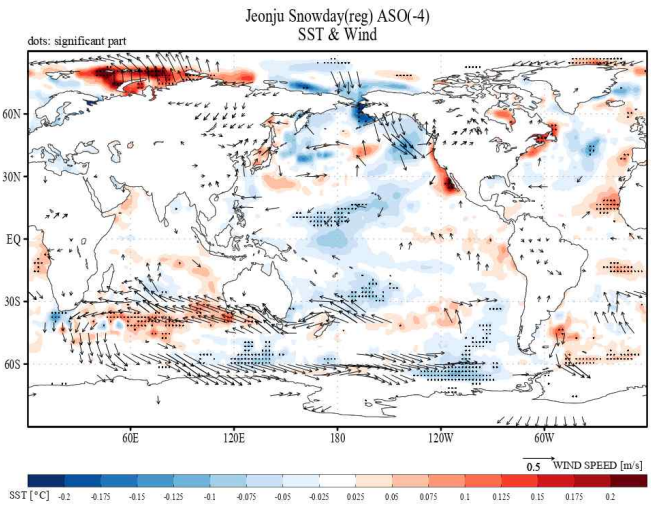


Fig. 9. 4~6개월 전 전주시 눈일수와 기후변수간의 회귀장. (a-c) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (d-f) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

Fig. 9. (a)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 그린란드 북부와 아프리카 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 남극과 영국 서부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 9. (d)에서는 소말리아 동부와 마다가스카르 남부, 서사하라 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북대서양과 중앙태평양, 동중국해와 뉴질랜드 동북부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 북극에서 고기압성 회전이 보인다.

Fig. 9. (b)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 러시아와 스칸디나비아반도 북부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 남극에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 9. (e)에서는 마다가스카르 남부, 서사하라 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북대서양과 중앙태평양, 남극해와 뉴질랜드 동북부에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 남극에 저기압성 회전이 보이며 한반도상에는 남풍계열의 바람이 불고 있다.

Fig. 9. (c)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 러시아 서북부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 캐나다 서부와 캄차카 반도 남부, 알레스카 북부, 남극에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

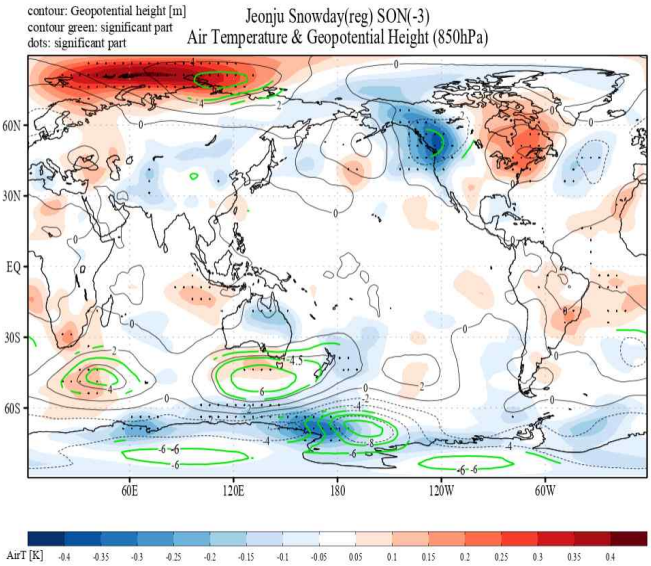
Fig. 9. (f)에서는 호주 남서부와 러시아 북부, 서사하라 서부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 알레스카 서부와 남극해, 중앙 태평양에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 한반도 상에 남풍 계열의 바람이 불고 있으며 남극에 저기압성 회전이 보인다.

Fig. 9. Air temperature & Geopotential height의 3개월 추세에서 positive anomaly는 러시아 북부 북극의 signal은 점차 강해지지만 캐나다 동부의 signal은 점차 약해지는 것이 보인다. negative anomaly는 남극해 일대는 유지되고 있지만 캐나다서부의 경우 점차 강화되는 것이 보인다.

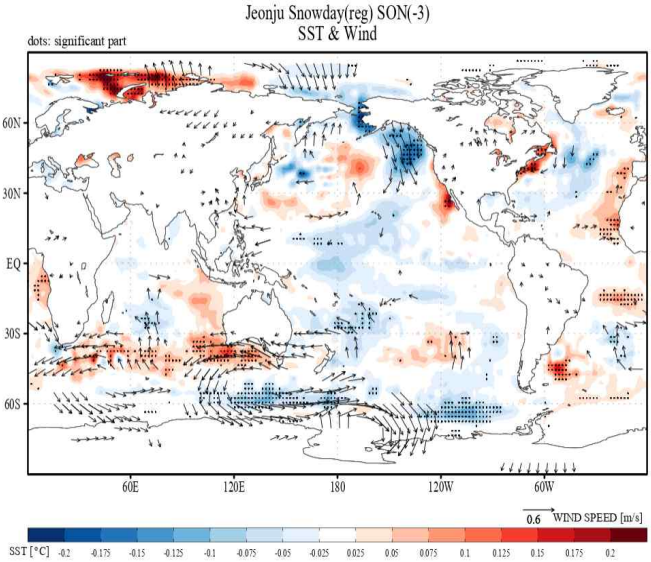
SST & Wind vector의 3개월 추세에서 큰 변화는 없어 보이나 캐나다 동부의 negative anomaly가 점차 약화되고 있으며 남극의 저기압성 회전이 유지되고 있음을 볼 수 있다.

3-2-2-4. SON(-3), OND(-2), NDJ(-1)

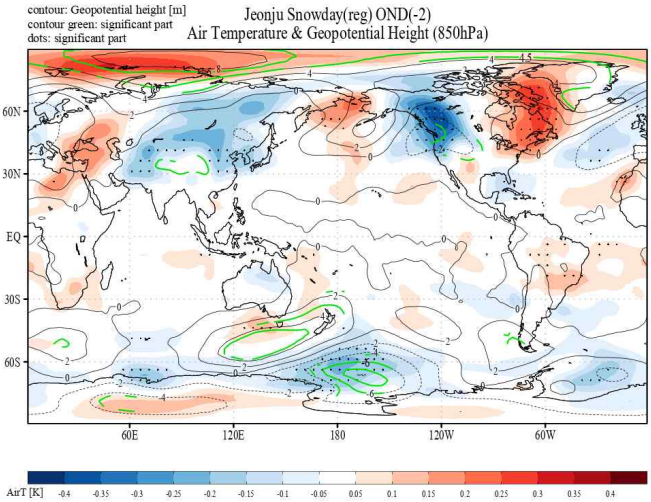
(a)



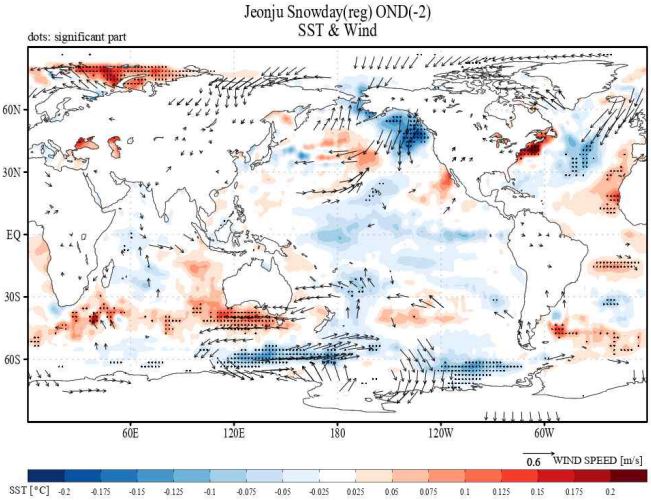
(d)



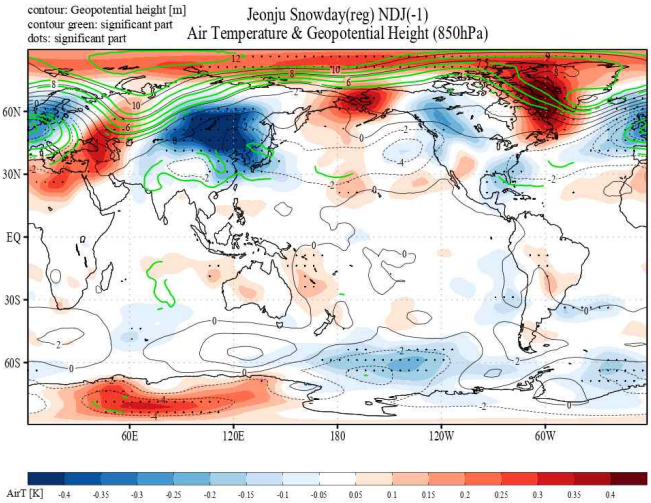
(b)



(e)



(c)



(f)

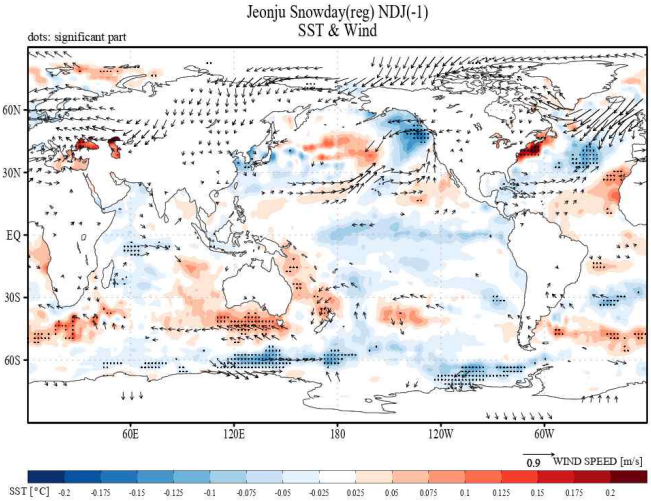


Fig. 10. 1~3개월 전 전주시 눈일수와기후변수간의 회귀장. (a-c) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (d-f) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

Fig. 10. (a)의 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 러시아 북부와 캐나다 동북부 부분에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 캐나다 서부와 남극에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 10. (d)에서는 호주 남부과 러시아 북부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 캐나다 서부과 남극해에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장은 한반도상에서는 남풍계열의 바람이 있다.

Fig. 10. (b)의 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 캐나다 동북부, 캄차카 반도 동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 중국 및 한반도 일대, 아프가니스탄, 남극해에서 유의한 negative anomaly이 나왔다.

Fig. 10. (e)에서는 호주 남부와 러시아 북부, 미국 동부에서 유의한 positive anomaly이 나왔으며 캐나다 서부와 북대서양 중앙, 남극해에서 유의한 negative anomaly이 나왔다. 바람장을 보면 한반도상에는 크게 바람의 방향이 보이지 않으며 북극 일대에 고기압성 바람의 회전이 보인다.

Fig. 10. (c)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 DJF(-1)과 같이 북아프리카와 북극, 흑해일대, 그린란드, 알래스카, 남극의 동경 부분에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 중앙아시아, 동북아시아와 남극해, 북유럽 부분에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 10. (f)에서는 호주 남부와 아프리카 남부 및 서부, 미국 동부에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 캐나다 서부, 남극해, 북대서양 중앙 부근에서 유의한 negative anomaly가 나왔다. 바람장을 보면 미국 동부에서 저기압성 회전이 보이며 한반도상에는 북동풍 계열 바람이 불고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10. Air temperature & Geopotential height의 3개월 추세에서 positive anomaly는 북극, 북아프리카, 알레스카 서부, 캐나다 동부, 남극의 동경부분, negative anomaly는 북유럽, 중앙아시아, 동북아시아에서 나타나고 있다는 점에서 공통점이 있지만 시간이 현재로 감에 따라 signal이 강화되는 것이 보이며 북미의 negative anomaly가 약해짐에 따라 positive anomaly가 나타나는 것이 보인다.

SST & Wind vector의 3개월 추세에서 SST의 positive anomaly는 호주 남부, 미국 동부지역은 유지되고 있으며 북유럽 북부 일대에 나타났다 사라지기 시작하였다. negative anomaly는 남극일대의 signal은 유지 되었으나 한반도 일대의 signal들이 나타나고 있으며 케나다 서부에 없던 signal들이 약화되기 시작했다.

바람장을 보면 전반적으로 풍속이 약해진 것이 보인다. 북태평양의 저기압성 회전과 한반도상의 북서풍이 나타나고 있다.

3-2-2-5. DJF(-0)

(a) (b)

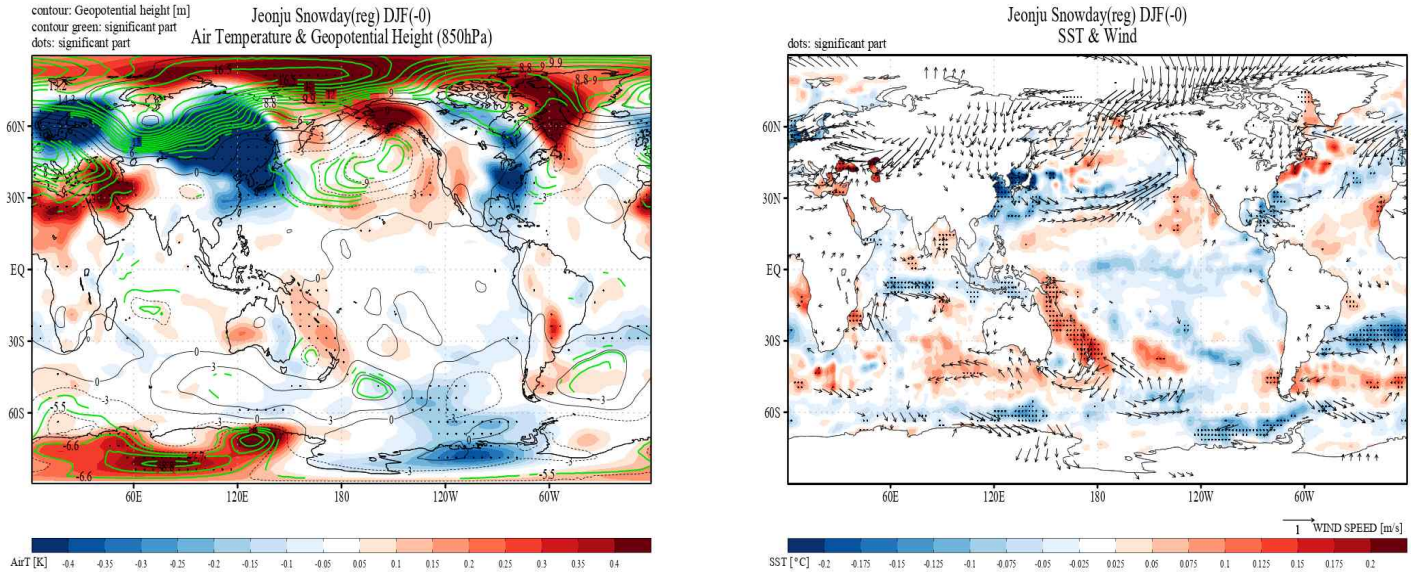


Fig. 11. 0개월 전 전주시 눈일수와 기후변수간의 회귀장. (a) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다. (b) 전지구 SST 및 바람장. SST는 shading으로 도시되며, 바람장은 vector로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다.

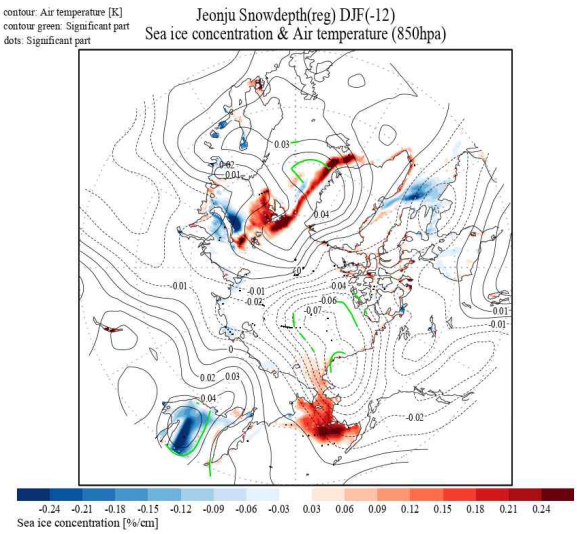
Fig. 11. (a)에서 850hPa 고도의 Air temperature & Geopotential height에서는 호주 동부와 북아프리카, 북극, 그린란드, 남극의 동경 부분에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 중앙아시아, 동북아시아 일대와 북유럽, 북아메리카 동부, 남극의 서경 부분에서 유의한 negative anomaly가 나왔다.

Fig. 11. (b)에서는 호주 동부와 마다가스카르 서부, 캐나다 동부 해안, 흑해 부근에서 유의한 positive anomaly가 나왔으며 남아메리카 동부, 남극해, 한반도 근처 해역과 인도 남부, 동남아시아 해역에서 유의한 negative anomaly이 나왔다. 바람장은 북태평양 일대, 남대서양에 저기압성 회전이 보이며 한반도 상에 북서풍 계열의 바람이 보인다.

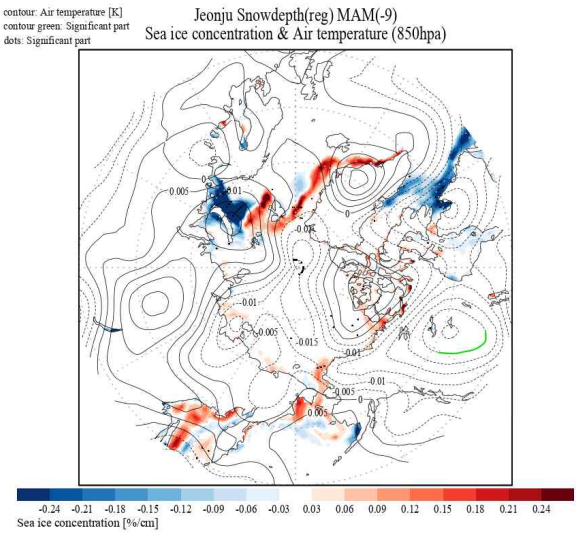
3-2-3. Sea ice concentration – Air temperature(Snowdepth)

3-2-3-1. DJF(-12), JFM(-11), FMA(-10), MAM(-9), AMJ(-8), MJJ(-7)

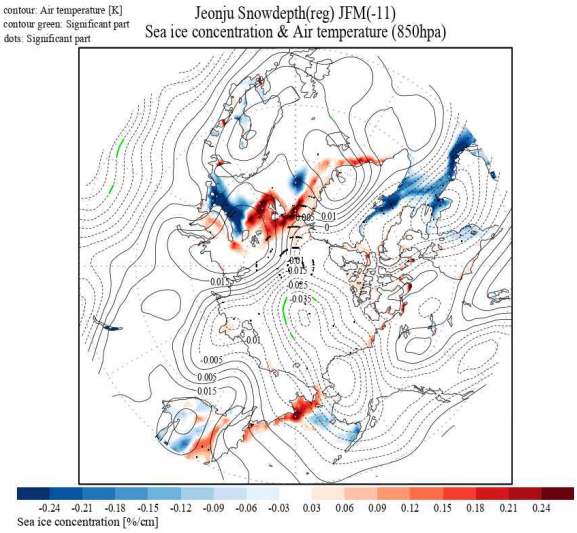
(a)



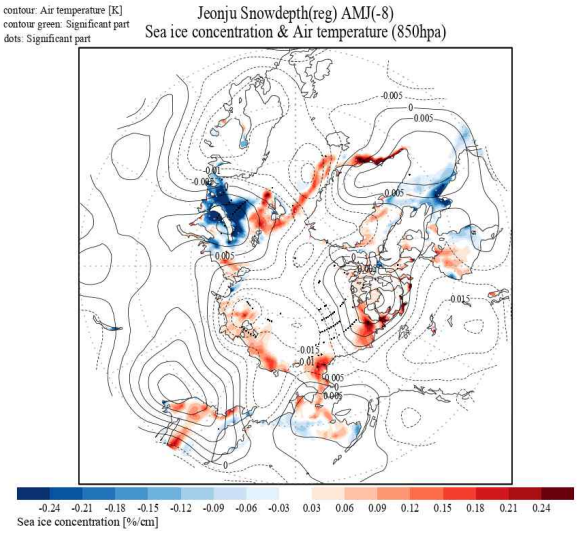
(d)



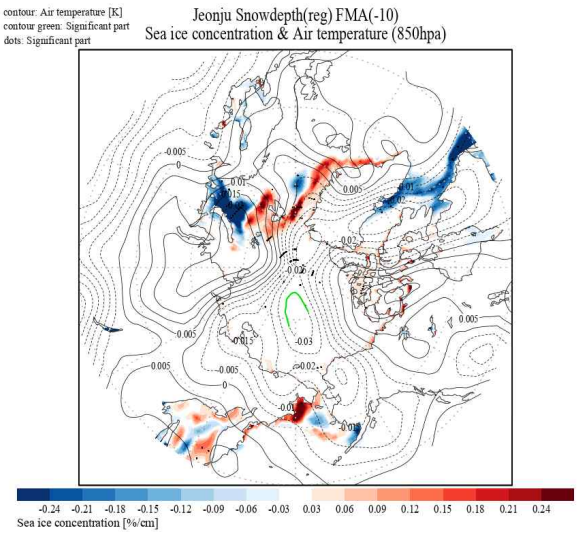
(b)



(e)



(c)



(f)

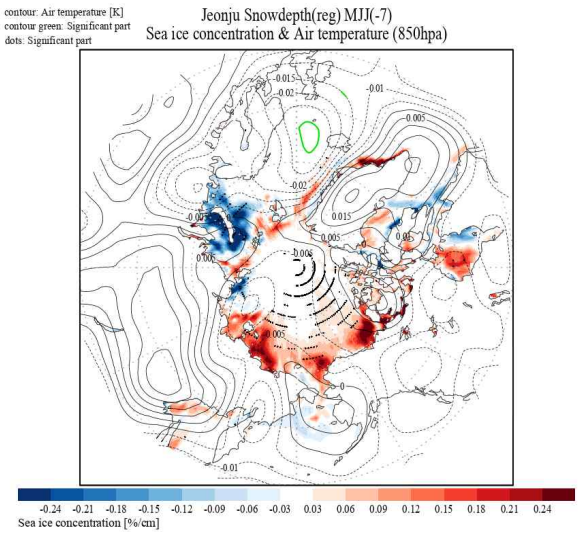


Fig. 12. 7~12개월 전 전주시 적설량과 기후변수간의 회귀장. (a-f) 북위 50˚~90˚ 구간 Sea ice concentration과 Air temperature. Sea ice concentration은 shading으로 도시되며, Air temperature는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다.

Sea ice concentration은 빙하와 액체상태의 물의 비율로서 0~100%의 값으로 보여준다. 100에 가까울수록 고체 상태의 빙하가 많은 것이고 0에 가까울수록 액체 상태의 물에 가까운 것이다.

Fig. 12. (a)의 북극 Sea ice concentration에서 베링 해, 그린란드 동쪽 해역 부분에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 람테프 해에 negative anomaly인 부분이 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 그린란드 동쪽과 오호츠크 해 일대에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 시베리아 북부 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 12. (b)의 북극 Sea ice concentration에서 그린란드 동쪽 해역 부분에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 유의한 positive anomaly는 없으며 추코트 해와 서시베리아 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 12. (c)의 북극 Sea ice concentration에서 그린란드 동쪽 해역 부분에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 바렌츠해에 negative anomaly인 부분이 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 유의한 positive anomaly는 없으며 추코트 해 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 12. (d)의 북극 Sea ice concentration에서 그린란드 동쪽 해역 부분에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 바렌츠해에 negative anomaly인 부분이 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 유의한 positive anomaly는 없으며 캐나다 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

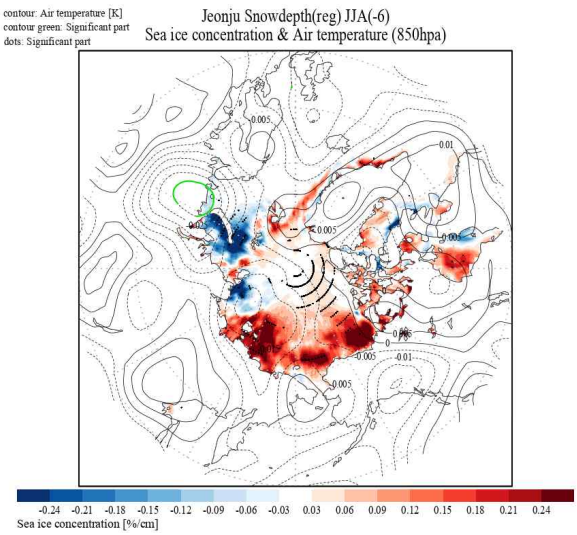
Fig. 12. (e)의 북극 Sea ice concentration에서 보퍼트 해, 람테프 해 일대에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 바렌츠해에 negative anomaly인 부분이 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 유의한 signal이 보이지 않는다.

Fig. 12. (f)의 북극 Sea ice concentration에서 60˚W ~ 150˚E 부분 북극 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 바렌츠해에 negative anomaly인 부분이 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 유의한 positive anomaly는 없으며 노르웨이 해 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

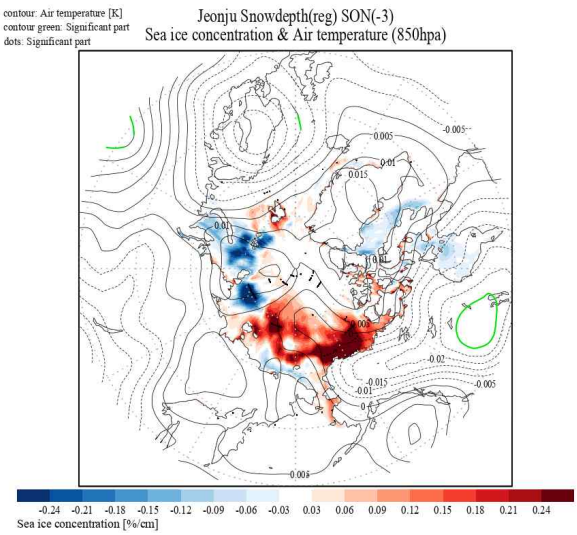
Fig. 12. 북극 Sea ice concentration에서 바렌츠 해를 중심으로 negative anomaly가 나타나는 것이 보인다. 시간이 흐름에 따라 positive anomaly가 강화되며 60˚W ~ 150˚E 부분 북극 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타나는 것이 보인다. Air temperature 경우 positive anomaly는 보이지 않으며 negative anomaly 또한 강도가 강하게 나타나지 않는다.

3-2-3-2. JJA(-6), JAS(-5), ASO(-4), SON(-3), OND(-2), NDJ(-1)

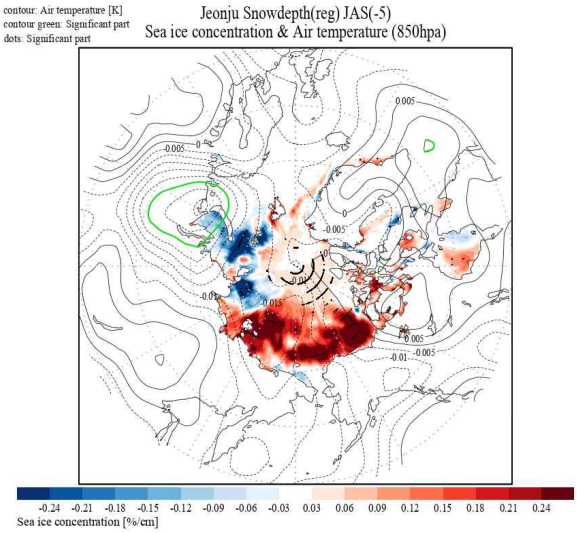
(a)



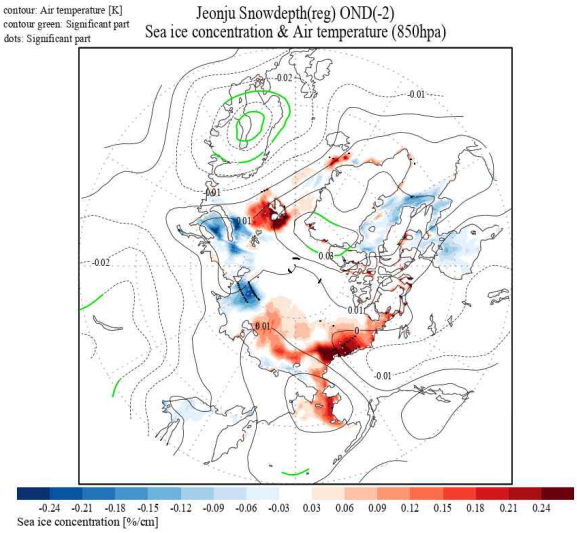
(d)



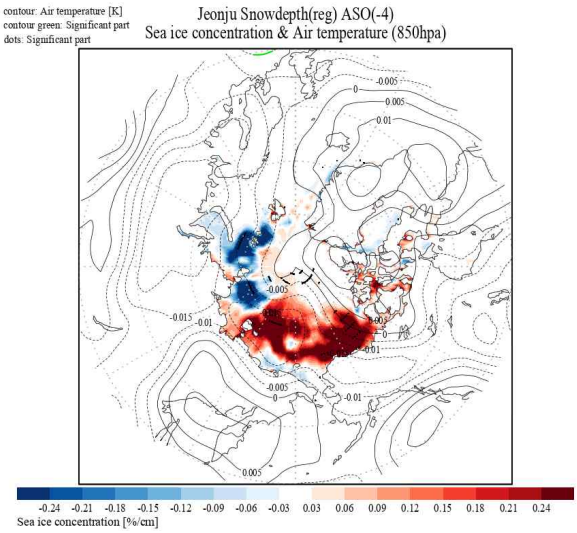
(b)



(e)



(c)



(f)

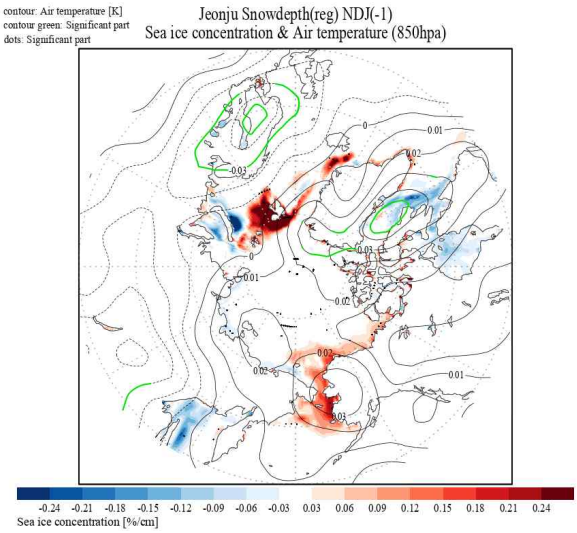


Fig. 13. 1~6개월 전 전주시 적설량과 기후변수간의 회귀장. (a-f) 북위 50°~90° 구간 Sea ice concentration과 Air temperature. Sea ice concentration은 shading으로 도시되며, Air temperature는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다.

Fig. 13. (a)의 북극 Sea ice concentration에서 북극 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 람테프 해에 negative anomaly인 부분이 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 바렌츠 해 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 13. (b)의 북극 Sea ice concentration에서 북극 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 람테프 해에 negative anomaly인 부분 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 바렌츠 해 일대에 유의한 negative anomaly가 보인다.

Fig. 13. (c)의 북극 Sea ice concentration에서 보퍼트 해, 추코트 해, 동시베리아 해에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 카라-람테프 해에 negative anomaly인 부분이 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 프랑스 일대에 유의한 negative anomaly가 보인다.

Fig. 13. (d)의 북극 Sea ice concentration에서 보퍼트 해, 추코트 해, 동시베리아 해에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 람테프 해에 negative anomaly인 부분이 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 러시아 서쪽에 유의한 positive anomaly가 보이며 캐나다 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 13. (e)의 북극 Sea ice concentration에서 보퍼트 해, 추코트 해에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났으며 람테프 해에 negative anomaly인 부분이 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 그린란드 북부에 유의한 positive anomaly가 보이며 북유럽, 중앙아시아 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 13. (f)의 북극 Sea ice concentration에서 바렌츠 해를 중심으로 positive anomaly가 나타나는 것이 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 그린란드 북서부에 유의한 positive anomaly가 보이며 북유럽, 동아시아 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 13. 북극 Sea ice concentration에서 positive anomaly가 점차 줄어드는 것이 보이며 람테프 해에 negative anomaly가 오랫동안 유지되는 것 보인다. Air temperature 경우 겨울이 오면서 그린란드 부근에 positive anomaly가 나타나며 negative anomaly는 북유럽, 중앙아시아 일대에 나타난다.

3-2-3-3. DJF(-0)

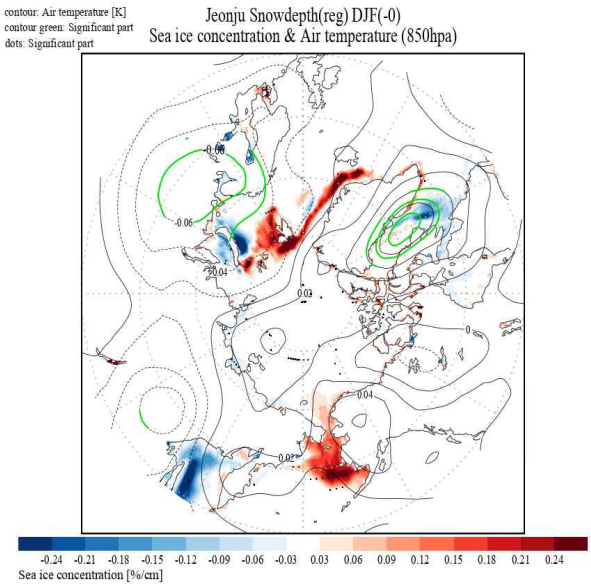


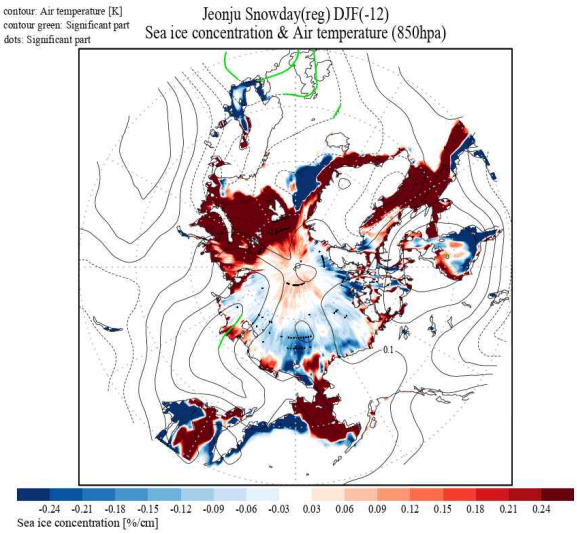
Fig. 14. 0개월 전 전주시 적설량과 기후변수간의 회귀장. 북위 50˚~90˚ 구간 Sea ice concentration과 Air temperature. Sea ice concentration은 shading으로 도시되며, Air temperature는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다.

Fig. 14의 북극 Sea ice concentration에서 바렌츠 해, 베링 해를 중심으로 positive anomaly가 나타나며 카라 해, 람테프 해에 negative anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 그린란드 서부에 유의한 positive anomaly가 보이며 북유럽, 동아시아 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

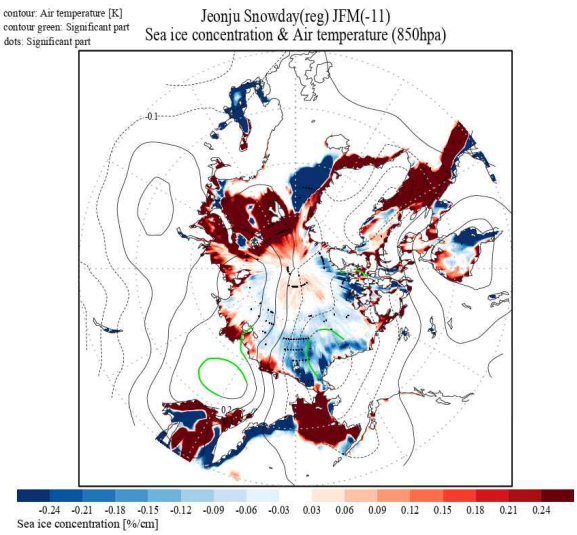
3-2-4. Sea ice concentration – Air temperature(Snowday)

3-2-4-1. DJF(-12), JFM(-11), FMA(-10), MAM(-9), AMJ(-8), MJJ(-7)

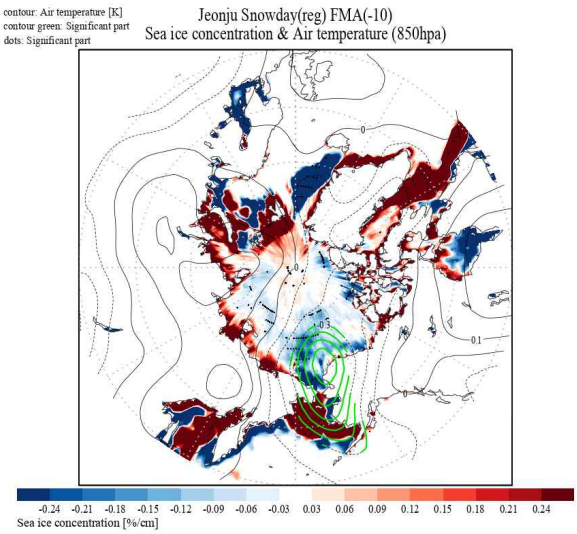
(a)



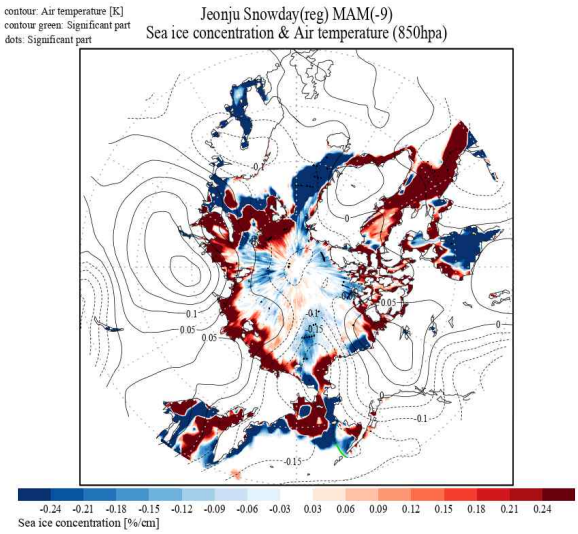
(b)



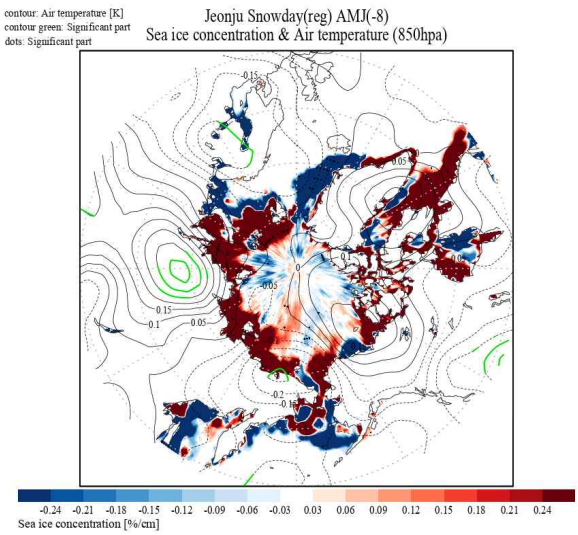
(c)



(d)



(e)



(f)

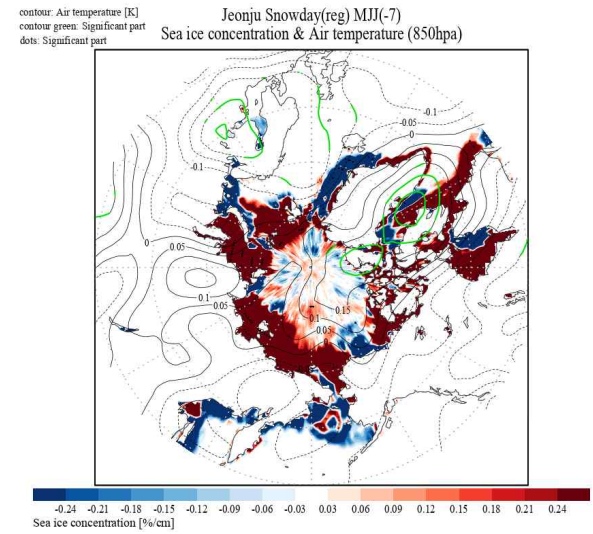


Fig. 15. 7~12개월 전 전주시 눈일수와 기후변수간의 회귀장. (a-f) 북위 50˚~90˚ 구간 Sea ice concentration과 Air temperature. Sea ice concentration은 shading으로 도시되며, Air temperature는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다.

Sea ice concentration은 빙하와 액체상태의 물의 비율로서 0~100%의 값으로 보여준다. 100에 가까울수록 고체 상태의 빙하가 많은 것이고 0에 가까울수록 액체 상태의 물에 가까운 것이다.

Fig. 15. (a)의 북극 Sea ice concentration에서 60˚W ~ 120˚E 부분에서 북극 전반적으로 유의한 negative anomaly가 나타났으며 그린란드 북부 동쪽 해역에 유의한 positive anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 람테프해 일대에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 영국, 프랑스 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 15. (b)의 북극 Sea ice concentration에서 60˚W ~ 120˚E를 부분에서 북극 전반적으로 유의한 negative anomaly가 나타났으며 보퍼트 해 및 그린란드 남서쪽 해역에 유의한 positive anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 동시베리아 일대에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 추코트 해 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 15. (c)의 북극 Sea ice concentration에서 60˚W ~ 120˚E를 부분에서 북극 전반적으로 유의한 negative anomaly가 나타났으며 그린란드 동쪽 해역 또한 유의한 signal이 나타났다. 보퍼트 해 및 그린란드 남서쪽 해역에 유의한 positive anomaly가 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 추코트 해 일대에 유의한 negative anomaly가 보인다.

Fig. 15. (d)의 북극 Sea ice concentration에서 그린란드 북부와 동부 해역에 negative anomaly가 보이며 보퍼트 해에 positive anomaly가 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 알레스카 남쪽에 유의한 negative anomaly가 보인다.

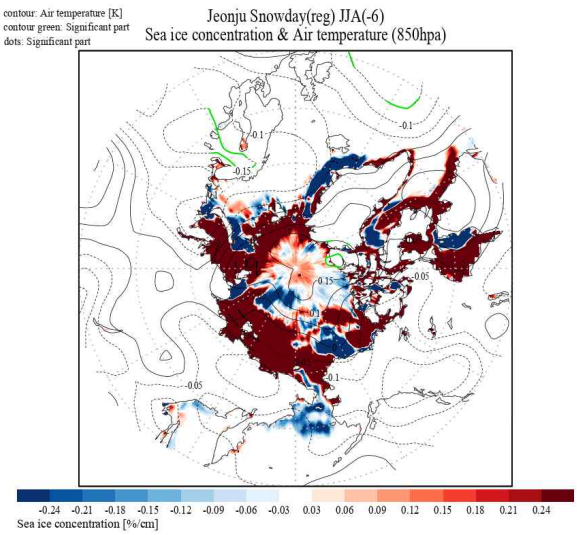
Fig. 15. (e)의 북극 Sea ice concentration에서 보퍼트 해, 카라해 일대에 유의한 positive anomaly가 보이며 그린란드 동쪽에 negative anomaly가 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 시베리아 일대에 positive anomaly가 나왔으며 북유럽과 동시베리아, 캐나다 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 15. (f)의 북극 Sea ice concentration에서 보퍼트 해, 카라해 일대에 유의한 positive anomaly가 보이며 그린란드 동쪽에 negative anomaly가 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 그린란드 서쪽에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북유럽 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

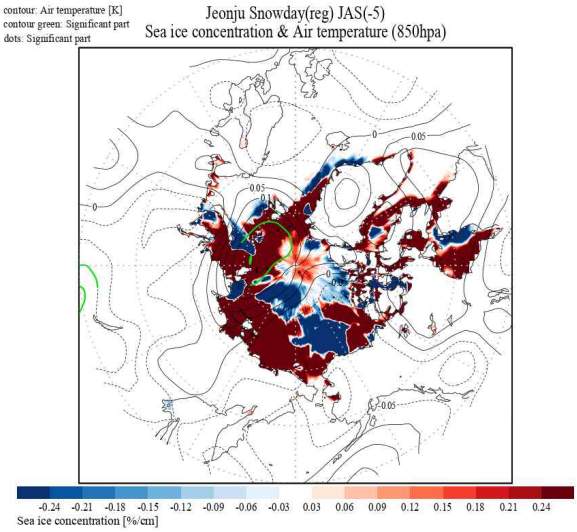
Fig. 15. 북극 Sea ice concentration에서 북극 전반적으로 보이던 negative anomaly 가 점차 영역이 줄어들면서 카라-바렌츠 해를 중심으로 positive anomaly 나타나는 것이 보인다. Air temperature 경우 시베리아에 positive anomaly가 주로 나타나며 유럽과 알레스카는 주로 negative anomaly가 나타난다.

3-2-4-2. JJA(-6), JAS(-5), ASO(-4), SON(-3), OND(-2), NDJ(-1)

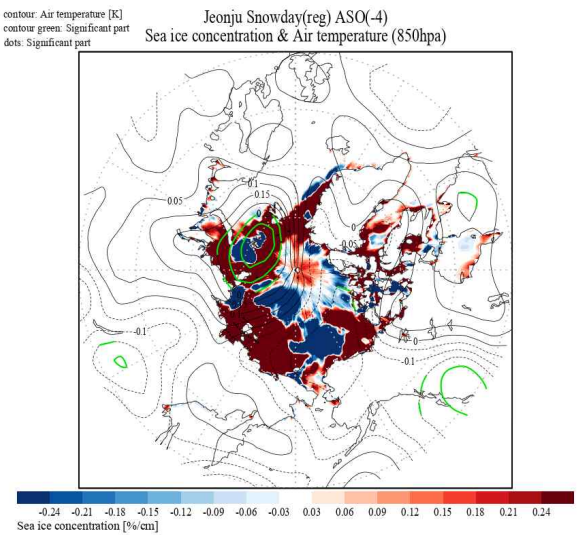
(a)



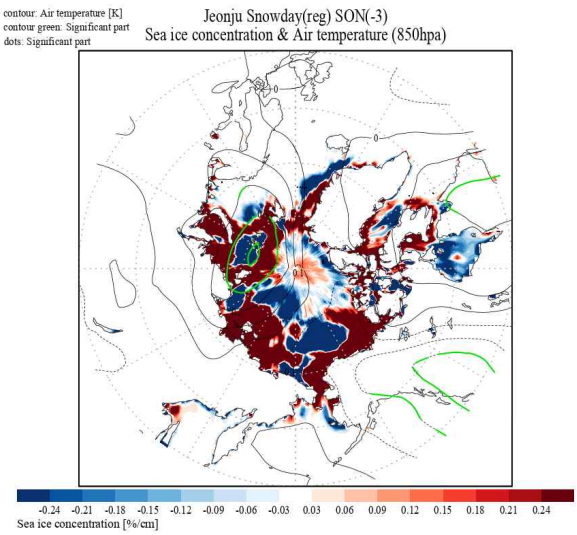
(b)



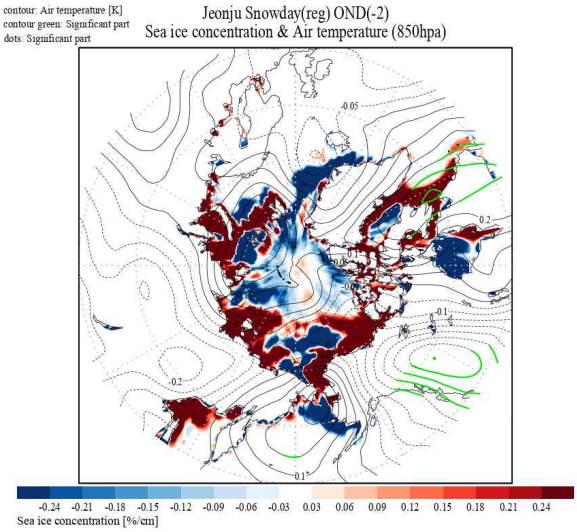
(c)



(d)



(e)



(f)

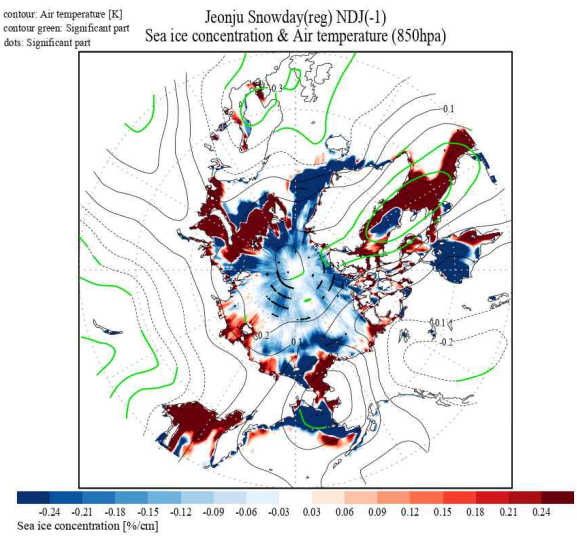


Fig. 16. 1~6개월 전 전주시 눈일수와 기후변수간의 회귀장. (a-f) 북위 50˚~90˚ 구간 Sea ice concentration과 Air temperature. Sea ice concentration은 shading으로 도시되며, Air temperature는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다.

Fig. 16. (a)의 북극 Sea ice concentration에서 카라 해, 람테프 해 부분에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 베른 해 일대에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북유럽, 북대서양 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 16. (b)의 북극 Sea ice concentration에서 람테프 해 부분에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 카라 해 일대에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 중앙아시아 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 16. (c)의 북극 Sea ice concentration에서 람테프 해 부분에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 카라 해 일대에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 중앙아시아와 캐나다 서부 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 16. (d)의 북극 Sea ice concentration에서 람테프 해 부분에서 전반적으로 유의한 positive anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 카라 해 일대와 캐나다 동부에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 캐나다 서부 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 16. (e)의 북극 Sea ice concentration에서 람테프 해 일대에 유의한 positive anomaly가 보이며 극을 중심으로 negative anomaly가 보인다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 캐나다 동부에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 캐나다 서부 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 16. (f)의 북극 Sea ice concentration에서 30˚W ~ 30˚E를 제외한 북극 전반적으로 유의한 negative anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 그린란드 서쪽에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북유럽 일대, 중앙아시아, 캐나다 북부에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

Fig. 16. 북극 Sea ice concentration에서 람테프 해를 중심으로 positive anomaly 나타나는 것이 보인다. 시간이 흐름에 따라 positive anomaly가 약화되며 30˚W ~ 30˚E를 제외한 북극 전반적으로 유의한 negative anomaly가 나타나는 것이 보인다. Air temperature 경우 카라해에 positive anomaly가 주로 나타나며 겨울이 됨에 따라 북유럽과 중앙아시아에 negative anomaly가 나타난다.

3-2-4-3. DJF(-0)

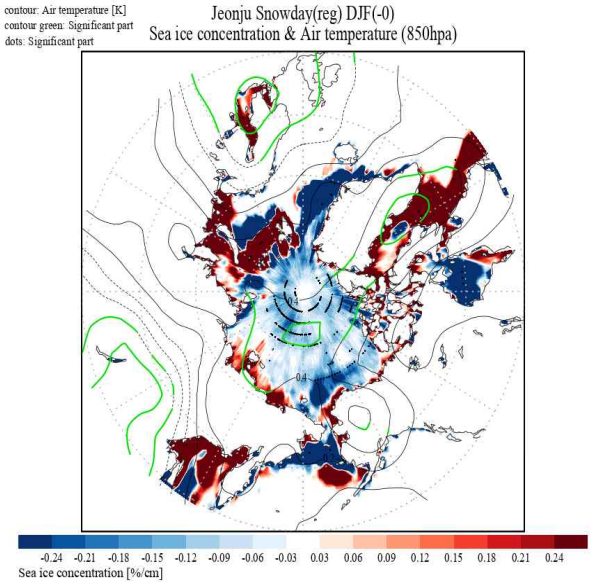
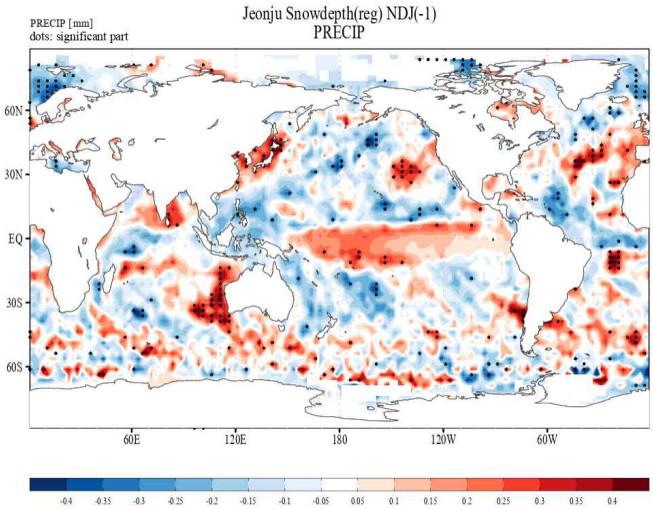


Fig. 17. 0개월 전 전주시 눈일수와 기후변수간의 회귀장. 북위 50˚~90˚ 구간 Sea ice concentration과 Air temperature. Sea ice concentration은 shading으로 도시되며, Air temperature는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다.

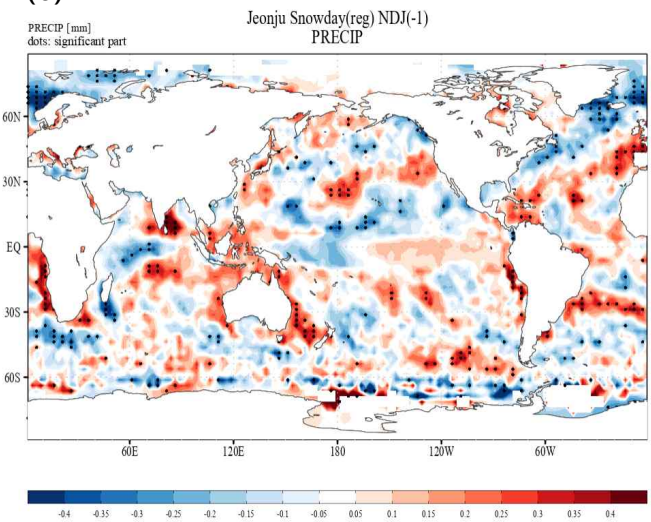
Fig. 17. 북극 Sea ice concentration에서 30˚W ~ 30˚E를 제외한 북극 전반적으로 유의한 negative anomaly가 나타났다. 850hPa 고도의 Air temperature에서는 그린란드 서쪽에 유의한 positive anomaly가 나왔으며 북유럽과 몽골, 만주 일대에 유의한 negative anomaly가 나타났다.

3-3. Linear Baroclinic Model(LBM)

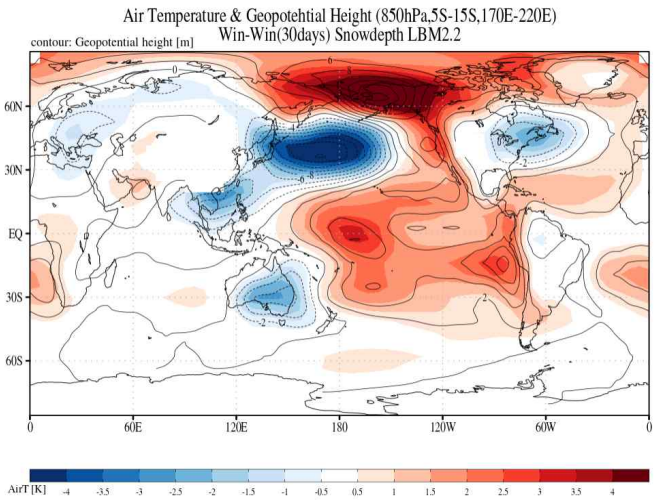
(a)



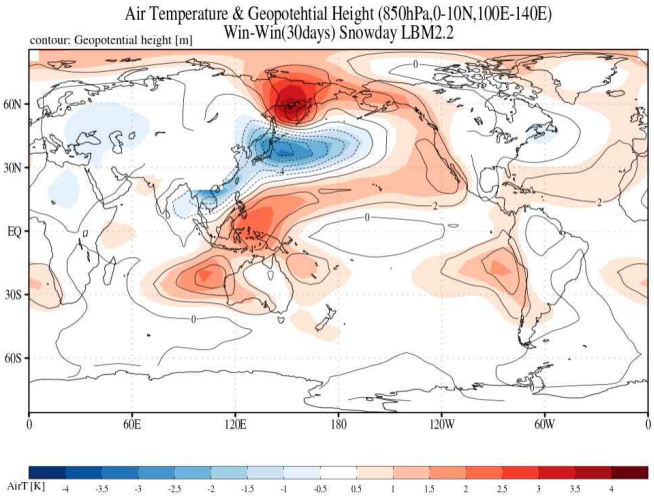
(b)



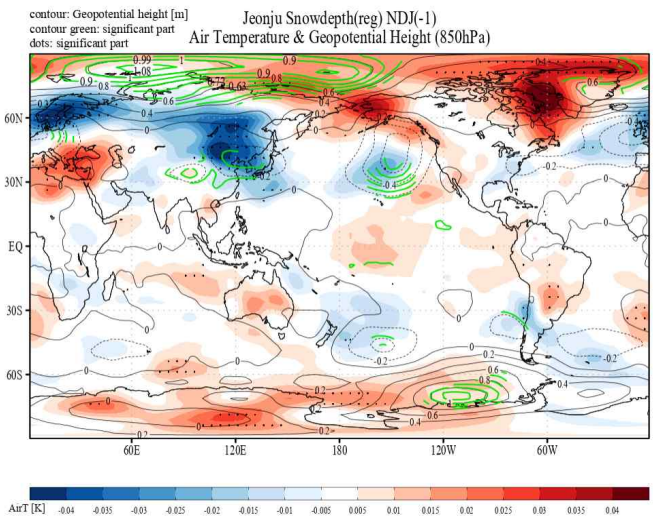
(c)



(d)



(e)



(f)

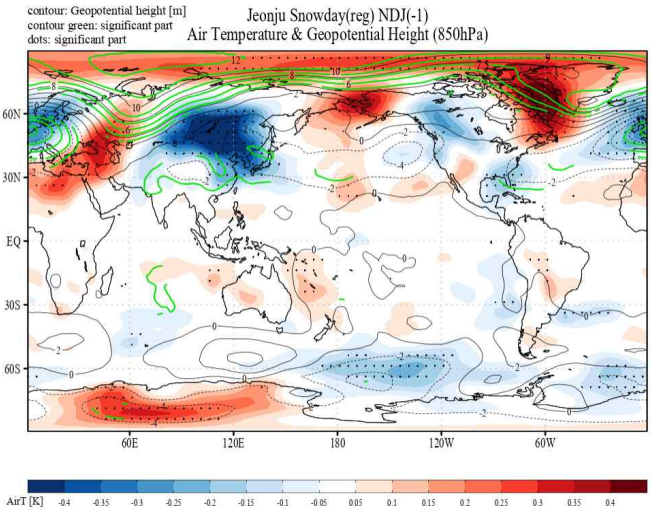


Fig. 18. 전주시 강설변수에 대한 강수 회귀장에 따른 모형실험 결과와 1개월 전 전주시 강설과 기후변수간의 회귀장. (a-b) 전지구 Precipitation 회귀장. Precipitation은 shading으로 도시되며, 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots로 표시하였다. (c-d) 모형실험을 통해 살펴본 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. (e-f) 전지구 Air temperature와 지위고도장. Air temperature는 shading으로 도시되며, 지위고도는 contour로 나타난다. 해당 회귀장에서 유의한 구간 (p-value < 0.10)의 경우 dots와 초록색 contour로 표시하였다.

본 연구의 회귀장 분석 결과, 전주시 겨울철 최심적설과 눈일수에 대해 ENSO라는 기후 특성이 나타났다. 따라서 연구 방법에서도 언급하였듯이 ENSO를 Linear Baroclinic Model(LBM)에 적용시켜 선형화된 대기 흐름에서도 동일한지 비교할 것이다. ENSO의 경우 평년에는 열대 서태평양에 활발하게 발생했던 대류 활동이 엘니뇨 해에는 중-동태평양의 해수면 온도 상승으로 인해 열대 중태평양 지역으로 이동하게 된다. 반면에 라니냐 해에는 열대 동태평양의 해수면 온도는 하강하고 대기의 대류 지역은 서태평양으로 이동한다. 이러한 대기의 대류 활동은 대류권 중층에서 잠열을 방출하고, 이는 대기 순환의 동력으로 작용한다[8].

또한 대기의 대류 활동은 강수와 연관되어 있으므로 모형실험 전에 우선 전주시 겨울철 최심적설 및 눈일수에 대한 전지구 Precipitation의 회귀분석을 진행한다. 이후 열대 태평양 부근의 유의한 구간에서 나타나는 아노말리에 대한 양의 강제력이나 음의 강제력을 비발산고도인 500hPa 부근에 주어 모형실험을 진행한다. 참고로, Fig. 18. (c, d)의 shading과 contour는 강제력에 대한 850hPa Air temperature와 지위고도장 반응이 평형상태에 도달되었다고 판단된 때를 나타낸 것이다. LBM의 경우 평형상태에 도달하면 패턴의 변화는 거의 없고 강도만 강해진다. 평형상태 이후의 결과는 강도가 과대해져서 패턴이 잘 식별되지 않을 수 있기 때문에 보통 평형상태에 도달했을 때의 모형결과를 나타낸다[7].

전주시 겨울철 최심적설과 전지구 Precipitation의 회귀분석 결과, Fig. 18. (a)에서 볼 수 있듯이 위도 5˚S ~ 15˚S, 경도 170˚E ~ 220˚E에서 유의한 positive anomaly가 나타난다. Fig. 18. (c)는 이 유의한 구간에 양의 강제력을 준 후 모형실험을 통해서 대기장의 변화를 살펴본 그림이다. 본 연구의 회귀장 분석에서 진행한 Fig. 18. (e)와 비교해보면 그린란드 서북부와 북극에서 유의한 positive anomaly, 북유럽에서 유의한 negative anomaly가 일치한다. 또한 우리나라 부근에서 유의한 음의 대기 온도 아노말리와 저기압성 아노말리가 일치한다.

전주시 겨울철 눈일수와 전지구 Precipitation의 회귀분석 결과, Fig. 18. (b)에서 볼 수 있듯이 위도 0˚N ~ 10˚N, 경도 100˚E ~ 140˚E에서 유의한 positive anomaly가 나타난다. Fig. 18. (d)는 이 유의한 구간에 양의 강제력을 준 후 모형실험을 통해서 대기장의 변화를 살펴본 그림이다. 본 연구의 회귀장 분석에서 진행한 Fig. 18. (f)와 비교해보면 알래스카와 북극에서 유의한 positive anomaly, 우리나라 부근에서 유의한 음의 대기 온도 아노말리와 저기압성 아노말리가 일치한다.

4. 결론 및 고찰

전주시 최심적설, 눈일수 자료와 해양 및 대기 시스템의 각 변수 데이터를 가공 후 3개월 이동평균된 자료를 가지고 회귀장 분석을 한 결과, ENSO의 signal이 나타났다. 최심적설의 경우 약 8개월 전부터 엘니뇨 이벤트간의 연관성이 확인되었으며, 눈일수의 경우 ENSO와의 관계가 최심적설에 비해 상대적으로 약한 것으로 나타났다. 실제 Linear Baroclinic Model(LBM) 결과 또한 ENSO와 전주시 겨울철 강설 기후 특성의 관계를 뒷받침해준다. 본 연구는 전주지역 대설로 인해 발생할 수 있는 피해를 예방할 수 있을 것으로 기대되며, Correlation 등의 통계분석 방법을 이용한 더 넓은 scale의 추후 연구가 필요하다.

5. REFERENCES

1) 관계부처합동, 2020년 이상기후 보고서, 2021.

2) 전주기상지청, 전북 2020년 겨울철 기후특성, 2021.

3) KRIHS 국토연구원, 한우석, 기후변화에 따른 폭설취약지역 증가와 대응방향, 2014.

4) 국립기상연구소 예보연구과, 극지연구소 극지기후변화연구부, 노준우, et al, 1979~2011년 북극진동지수 측면에서의 겨울철 남한지역 신적설과 최저 온도 특성, 2014.

5) Kerry H. Cook, Climate Dynamics, Princeton University Press, 2013, 4-48.

6) Park, Jong-Yeon, et al. "Seasonal to multiannual marine ecosystem prediction with a global Earth system model." Science 365.6450 (2019): 284-288.)

7) Lim, Won-Il, and Kyong-Hwan Seo. "Investigation on characteristics of summertime extreme temperature events occurred in South Korea using self-organizing map." Atmosphere 28.3 (2018): 305-315.

8) 국종성, 안순일, 예상욱, 함유근, 2016 엘니뇨 백서, 2016.