

한반도 기온 및 강수량 변동에 영향을 미치는 광역규모 기후지수들에 대한 고찰

김연희 · 김맹기* · 이우섭

공주대학교 대기과학과

(2008년 1월 28일 접수; 2008년 4월 11일 승인)

An Investigation of Large-Scale Climate Indices with the influence on Temperature and Precipitation Variation in Korea

Yeon-Hee Kim, Maeng-Ki Kim* and Woo-Seop Lee

Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

(Manuscript received 28 January 2008; in final form 11 April 2008)

Abstract

In this study we have investigated the preceding eighteen large-scale climate indices with a lead time from zero to twelve months that have an influence on the variability of temperature and precipitation in Korea in order to understand which climate indices are overall available as predictors for long-range forecasting. We also have studied the dynamic link between preceding large-scale climate indices and regional climate using singular value decomposition analysis (SVDA) and correlation analysis (CA). Based on the coupled mode between large-scale circulation and regional climate, and correlation pattern between the preceding large-scale climate indices and large-scale circulation, the level of significance on climate indices as a predictor for monthly mean temperature and precipitation was evaluated for 5 and 1% level.

Key words: Large-scale climate index, Korea climate, Coupled mode, Dynamic link, Lag correlation

1. 서론

기후시스템을 구성하는 각 권역내의 변동과 권역간의 다양한 상호작용은 다양한 시간규모와 공간규모의 기후변동을 유발하며, 이러한 기후변동은 기후지수 (Climate Index)에 의해 효율적으로 나타낼 수 있다. 따라서 과거의 기후지수를 면밀히 관찰하면 현재의 기후 변동 상태를 광역 규모로 진단할 수 있으며, 장기 예측에도 다양한 방법으로 활용할 수 있다. 특히 기후 지수는 몬순 변동을 대변하는 바람차, 대기 순환을 나타내는 해면기압의 차, 특정지역의 해수면온도를 나타내는

지수 등 다양한 방법으로 만들어지며 다양한 지역의 기후 감시에 활용할 목적으로 만들어졌다 (Rasmusson and Carpenter, 1982; Barnston and Livezey, 1987; Enfield *et al.*, 1999; Thompson and Wallace, 2000; Schwing *et al.*, 2002; Jhun and Lee, 2004). 따라서 다양한 기후지수의 선택적인 활용은 기후변동의 감시에 유용하다고 할 수 있다.

최근 많은 연구에서는 기후지수와 지역기후의 상관성 분석을 통해 대규모 순환 패턴의 특성과 변화에 따른 동아시아 지역의 기후 변동을 이해하려는 연구가 계속 되고 있다 (Gong and Ho, 2003; 임은순 · 안중배, 2004; 김성 등, 2005; 신성철 등, 2006; Xin *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007; Kim and Kim, 2008). Gong and Ho(2003)는 낮은 북극진동(Arctic Oscillation, AO)과 동아시아 여름 총 강수량이 서로 음의 관계에 있음을 밝히고 그 역학적 메커니즘을 제시하였다. 임은순 과 안중배(2004)는 한반도 겨울철 기온 변동이 남방진

*Corresponding Author: Maeng-Ki Kim, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Chungnam 314-701 Korea.
Phone: +82-41-850-8531, fax: +82-41-856-8527
E-mail: mkkim@kongju.ac.kr

동지수 (Southern Oscillation Index, SOI), AO, 시베리아 고기압지수 (Siberian High Index, SHI) 그리고 겨울 몬순 지수 (Winter Monsoon Index, WMI)와 같은 대규모 순환지수와 어떤 상관성이 있는지를 분석하였으며, 겨울철 기온이 SOI보다 AO와 더 높은 상관관계에 있음을 밝혔다. 김성 등(2005)은 북반구 대기 순환에 대한 고유 변동 모드를 추출하여 광역규모의 원격상관에 대한 연관성을 조사하였으며, 스칸디나비아(Scandinavia, SCAND) 패턴과 북태평양(North Pacific, NP) 패턴을 봄 가뭄과 관련된 모드로 제시하여, 봄 가뭄의 예측가능성을 제안하였다.

기후변동을 나타내는 기후지수를 예측인자로 활용하여 장기 예측을 하려는 시도가 있어왔다 (Blender *et al.*, 2003; Qian and Saunders, 2003; 임은순 · 안중배, 2004; Kim *et al.*, 2007; Kim and Kim, 2008). 특히, Kim *et al.* (2007)은 한반도의 월별 기후를 예측하기 위하여 해당하는 월 보다 2개월에서 12개월 이전의 광역규모 기후지수들을 예측인자로 개발하고, 이를 이용하여 월별 기온과 강수량을 예측하는 모델을 개발하였으며, 또한 기후지수와 지역기후간의 역학적 관련성을 분석하여 제시하였다. 그러나 한반도의 기후변동과 관련하여 각 월별과 변수별로 어떤 기후지수가 연관되어 있는지, 어느 정도의 시간 지연을 갖고 연관되어 있는지를 종합적으로 고찰한 연구는 찾아보기 어렵다. 더욱이 최근에 세계 유수의 연구기관에서는 주요 기후지수들을 매달 갱신하면서 웹상에서 활용할 수 있도록 제공하고 있다. 따라서 이 연구에서는 한반도의 월 평균기온 및 강수량 변동과 연관된 모든 기후지수, 시간지연월수를 조사하고, 그 관련성에 대한 유의수준을 평가하고자 한다. 또한 대표적인 몇몇 기후지수가 한반도 주변의 대기 순환을 어떤 패턴으로 변화시키는지에 대해서 제시하고자 한다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 자료

본 연구에서 사용한 자료는 한반도 12개 기상관측소의 월평균 기온과 누적강수량이다(Table 1). 해면기압 자료는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/National Center for Atmospheric Research (NCAR) 재분석 자료로 수평해상도는 위·경도 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 이고 분석 영역은 동아시아 몬순 지역 ($80^{\circ}E \sim 180, 15^{\circ}N \sim 70^{\circ}N$)이다. 두 자료 모두 분석 기간

Table 1. List of Korean surface observation stations used in this study.

Station No.	Station	Latitude (°N)	Longitude (°E)
105	Gangnung	37.75	128.90
108	Seoul	37.57	126.97
112	Inchon	37.47	126.63
135	Chupungryoung	36.22	128.00
138	Pohang	36.03	129.38
143	Daegu	35.88	128.62
146	Jeonju	35.82	127.15
152	Ulsan	35.55	129.32
156	Kwangju	35.17	126.90
159	Busan	35.10	129.03
165	Mokpo	34.82	126.38
168	Yeosu	34.73	127.75

은 1954년부터 2003년까지 50년이다. 월별 기후지수는 Climate Diagnostic Center (CDC)와 Climate Prediction Center(CPC)의 홈페이지를 통해 매달 제공되는 18개 기후지수 자료를 사용하였고, 분석기간은 1953년부터 2003년까지 51년이다(Table 2).

본 연구에 사용된 기후지수의 주요 변동주기는 서로 다르며, 공간적인 변동성을 대표하는 지역 또한 서로 상이하다. 예를 들어, 대서양 장주기 진동 (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)은 대서양 해수면 온도 편차의 시계열 이용하여 나타낸 지수로 주기는 20~40년이다(Enfield *et al.*, 2001). 남방진동과 관련 있는 SOI, 다 변량 엘니뇨/남방진동 지수 (Multivariate ENSO Index, MEI), 적도 남방진동지수 (Equatorial SOI, ESO)는 2~7년의 주기를 가진다. 또한 기후지수는 서로 다른 공간 규모를 가진다. AO는 북반구 원격상관패턴지수 중의 하나로 북위 20도 이상의 북반구 해면기압에 대한 경험적 직교함수(EOF)의 첫 번째 모드의 표준화된 시계열로 정의되며 (Thompson and Wallace, 2000), 북반구의 중위도 지역기후 예측에 있어서 중요한 지수이다. TNA는 대서양의 위도 $5^{\circ}N \sim 25^{\circ}N$ 지역의 월 해수면 온도의 편차를 이용하여 나타낸 지수이고, TSA는 대서양의 위도 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}S$ 지역의 월 해수면 온도의 편차를 이용하여 나타낸 지수이다(Enfield *et al.*, 1999).

2.2 연구방법

본 연구에서는 한반도 기후 변동과 연관되어 있는 기후지수와 지연시간을 결정하기 위하여 한반도의 월 평균기온 및 강수량과 기후지수의 사이의 지연상관계수를 조사하였다. 지연 상관계수의 유의성은 t-검정을

Table 2. List of the climate indices updated on a monthly basis from the Climate Diagnostic Center (CDC) and Climate Prediction Center (CPC), NOAA.

Abbreviation	Full name	Source
AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation (Enfield <i>et al.</i> , 2001)	CDC*
AO	Arctic Oscillation (Thompson and Wallace, 2000)	CPC**
ESL	Equatorial Eastern Pacific SLP	CPC
ESO	Equatorial SOI	CPC
GML	Global Mean Land Ocean Temperature Index (Hansen <i>et al.</i> , 1999)	CDC
ISL	Indonesia SLP	CPC
MEI	Multivariate ENSO Index (Rasmusson and Carpenter, 1982)	CDC
NAO	North Atlantic Oscillation (Barnston and Livezey, 1987)	CPC
NOI	Northern Oscillation Index (Schwing <i>et al.</i> , 2002)	CDC
ONI	Oceanic Niño Index	CPC
PDO	Pacific Decadal Oscillation Index (Zhang <i>et al.</i> , 1997)	CDC
PNA	Pacific/North American Pattern (Barnston and Livezey, 1987)	CPC
SOI	Southern Oscillation Index (Rasmusson and Carpenter, 1982)	CPC
SWM	SW Monsoon Region Rainfall (Brasseur, 2001)	CDC
TNA	Tropical Northern Atlantic Index (Enfield <i>et al.</i> , 1999)	CDC
TSA	Tropical Southern Atlantic Index (Enfield <i>et al.</i> , 1999)	CDC
WHW	Western Hemisphere Warm Pool (Wang and Enfield, 2001)	CDC
WPO	West Pacific Oscillation (Barnston and Livezey, 1987)	CPC

*Climate Diagnostic Center

**Climate Prediction Center

이용하여 평가하였다. 의미 있는 기후지수의 선정은 유의수준 5%와 1%를 기준으로 결정하였다. 또한 선정된 기후지수가 어떻게 한반도의 기후변동과 역학적으로 연관되어 있는지를 제시하기 위하여 고유치분리법 (Singular Value Decomposition, SVD)을 이용하여 고유변동모드를 조사하였으며, 이를 기후지수와 한반도 주변의 해면기압간의 상관계수의 분포와 비교하였다. 여기서 SVD는 공분산을 활용하기 때문에 기후평균값은 자동적으로 제거된다. 따라서 SVD 분석방법은 한반도의 기후변동과 연관된 해면기압 패턴이 기후지수와 연관된 대기순환 패턴과 유사한지를 조사하여 기후지수가 한반도의 기후변동을 역학적으로 설명할 수 있는지를 판단하는데 유용하다. 이 연구에서는 한 예로서 해면기압에 대한 분석을 하였으나, 궁극적으로 다른 물리량에 대한 분석도 가능하다. 예를 들면 기후지수가 한반도 주변에서 어떤 열원(heat source)의 변화를 유발할 수 있는지 또는 어떤 습기원(moisture source)을 변화시키는 지에 대한 분석으로 확장이 가능하다.

3. 결과 분석

3.1 기온

Table 3과 4는 한반도 기온과 기후지수의 지연 상관

계수가 각각 5%, 1%이상 유의한 선행시간을 나타내며, 음의 상관계수를 가지는 선행시간은 굵고 비스듬하게 표시하였다. 예를 들어, 1월 기온과 1개월과 10개월 이전의 AO의 상관계수는 5%이상 유의하고(Table 3), 4월 기온과 1개월과 10개월 이전의 SOI의 상관계수는 1%이상 유의하다(Table 4). 봄철 기온과 유의한 지연 상관관계를 가지는 기후지수들의 종류가 다양하고, 여름철 기온과 유의한 지연 상관관계를 가지는 기후지수들의 종류는 적다. 4월 기온은 엘니뇨 남방진동 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO)과 관련된 기후지수들(MEI, ONI, SOI)과 유의한 상관관계를 가지는데, 이는 겨울철 태평양 해수면의 온도변화가 한반도 4월 기온에 영향을 준다는 것을 의미한다. 또한 한반도 겨울철 기온은 북반구 원격상관 지수들(AO, PNA, NAO)과 관련성이 높게 나타나는데, 이에 대한 선행연구들이 이 결과를 뒷받침해 준다. Gong and Ho(2002)은 겨울철 유라시아 대륙의 가장 중요한 활동 중 하나인 시베리아 고기압의 세기 변동이 AO의 변동성에 영향을 받고 있다고 제시하였다. 또한 임은순과 안중배(2004)는 한반도 겨울철 기온 변동성은 AO와 유의한 상관관계를 가지고, 공간분포에서도 전 지역에 걸쳐 고르게 그 영향을 미치고 있음을 밝혔으며, 신성철 등(2006)은 겨울철 한파와 AO 위상의 변화에 대한 연구를 통해 AO가 양의 위상일 때 보다 음의 위상일 때 기온이 더 낮다는 것

Table 3. Lag months of correlation coefficient between climate indices and Korean temperature over 5% significant level. The bold and inclined characters represent a negative correlation.

Index \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AMO		5	0,2, 3,8		12	1				1~4		1
AO	1, 10				5		2	2		9		
ESL			11, 12		0, 2				3			
ESO			6,7,10					2~4	2~5			
GML	1, 4, 7~10	2, 4~8, 12			2, 4~6	4,8			3, 5~9, 11	0, 2, 7	0, 1	0, 2~6, 8~12
ISL	1	1	1	2, 9	9	1	12		12		0, 1	0
MEI				0~5, 11	6~8, 12	0		0, 1	1, 12	5~6, 12		0~3
NAO	0, 9			2, 3, 10				2			6	12
NOI		9		5,10	9,11		11	3				2
ONI				4, 5, 9, 10	8			0~2				0, 1
PDO	0	8,9		1~4	1, 2, 5, 10, 12	2, 4, 5, 12	0		8~10	7, 8, 10		
PNA		9		3		5				5, 9, 10		
SOI				6, 8, 9, 11	7	1	12		0			0, 4
SWM	5			1	11	0	9	6	2			
TNA			6		10							
TSA	6			1	1, 2, 8			5~7, 11	9, 10	7		
WHW		2	1	0	3~7, 9, 12				6, 9, 11, 12	6, 8		2
WPO	1	4	1, 2, 4	2, 3, 12		0, 1, 5	0	1, 3		1, 8, 9	0	0

Table 4. Lag months of correlation coefficient between climate indices and Korean temperature over 1% significant level. The bold and inclined characters represent a negative correlation.

Index \ 월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AMO			1, 5~7, 9									
AO	0, 2	0	0, 1						11			
ESL			1	12	1	2, 5			0~2			
ESO				8					0, 1			
GML	3, 6	0, 1, 9~11	0~12	0~12	0, 1, 8~12	0~3, 5~7, 9~12			4, 12	1, 3~6		
ISL				6~8, 10~12	11							
MEI				6~10	9~11				0			
NAO		0	0	1			12		1			
NOI				7, 8, 11	6, 12							
ONI				6~8					0~2			
PDO				8	3~4, 11			0	0	9	11, 12	
PNA	0	0		4	0				9			
SOI				1, 10	11							
SWM							11					
TNA					11, 12							
TSA				2~7	3~7			8~10				
WHW				1~4					7, 8, 10	9, 10		
WPO	0	0, 1	5	9	3				7			

을 밝혔다.

본 연구에서는 SVD분석과 상관계수 공간분포도 분

석을 통해 한반도 기온과 지연 상관관계에 있는 기후지수들이 한반도 대기 순환장과 역학적으로 어떻게 연결

되어 있는지를 확인해 보았다. 그 예로, 1월 기온과 2개월 이전의 AO, 4월 기온과 11개월 이전의 SOI, 6월 기온과 2개월 이전의 동태평양 해면기압지수(Equatorial Eastern Pacific SLP, ESL) 그리고 12월 기온과 12개월 이전의 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation, NAO)을 선택하였다 (Fig. 1~4). 이러한 기후지수를 선택한 이유는 북반구 중위도에 위치한 한반도의 경우에 대해서 북극의 주요 시그널인 AO, 적도의 주요 시그널인 SOI, 중위도 시그널인 NAO을 대표적으로 고려하여 그 영향을 고찰하기 위해서이다. ESL의 경우 1% 유의수준을 보이고 SVD 및 상관분석에서 패턴 유사성이 뚜렷하여 선택하였다.

Fig. 1은 1월 한반도 기온과 해면기압의 첫 번째 SVD모드와 1월 해면기압과 2개월 선행하는 AO의 상관계수 공간분포도를 나타낸다. 해면기압 패턴의 주요 시그널은 시베리아 지역에 음의 부호가 보이고 반대로 북서 태평양 지역에 양의 부호가 보여 대륙-해양의 대

비 패턴을 보여준다. 이러한 패턴은 동아시아 지역에 나타나는 겨울철 전형적인 기압패턴으로 시베리아 고기압이 약해지고 북태평양 고기압의 확장으로 온난이류의 유입을 유도하여 한반도 기온을 증가 시킨다. 실제로 Fig. 1c에서 보여주는 것처럼 한반도는 모든 지역에서 양의 부호를 보여준다. 이 모드는 전체 공분산의 99.1%를 설명하고 두 시계열의 상관계수는 0.76로 밀접한 관련성을 보여준다(Fig. 1d). Fig. 1b는 1월 해면기압과 2개월 이전의 AO의 상관계수 공간분포도를 나타낸다. 시베리아 지역에서 1%이상 유의한 음의 상관관계가 나타나고, 캄차카 반도 지역에서 5%이상 유의한 양의 상관관계가 나타난다. SVD의 해면기압 패턴(Fig. 1a)과 상관계수의 공간패턴(Fig. 1b)을 서로 비교해보면, 시베리아 지역과 북서 태평양의 오후츠크 해 주변에서 패턴이 매우 유사하게 나타난다. 이것은 2개월 이전의 AO가 시베리아 고기압과 오후츠크 해 저기압을 약화시켜, 한반도에 한랭이류가 유입되는 것을 막고 해

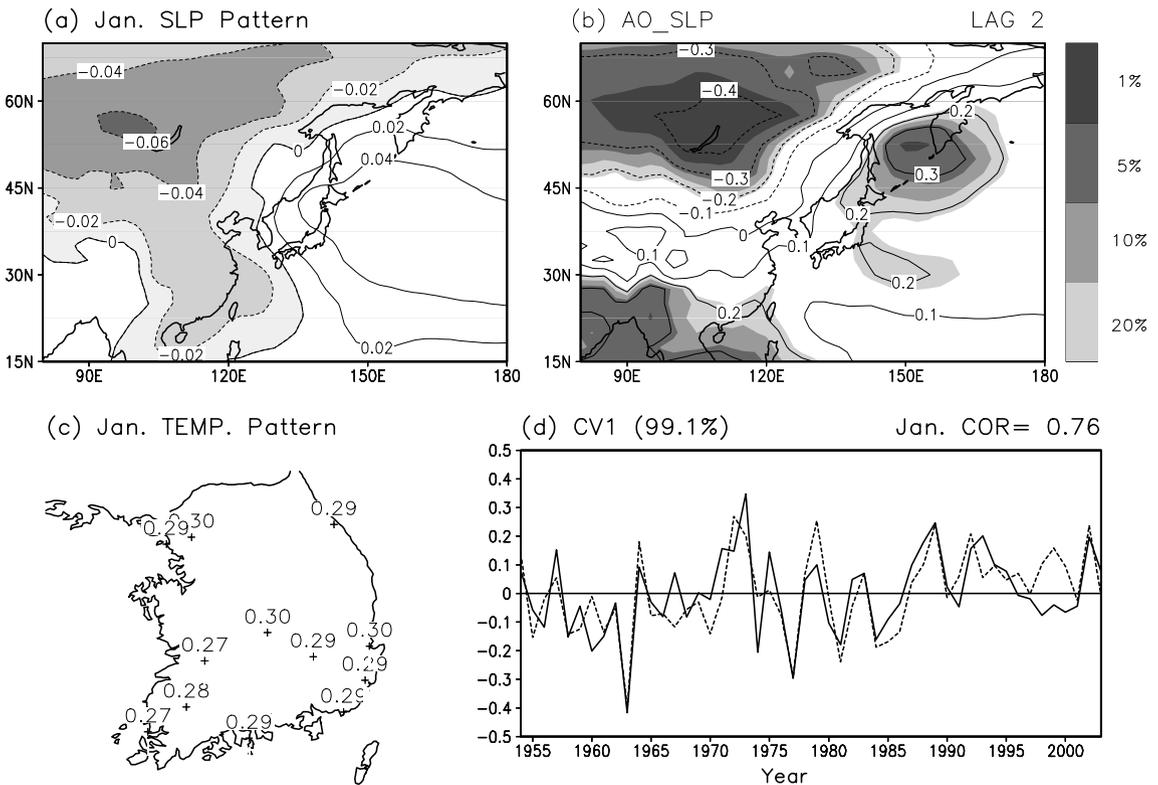


Fig. 1. First SVD mode of (a) observed SLP and (c) Korean temperature in January. This mode explains 99.1% of total covariance. The negative values are shaded in (a). (d) Associated time coefficients of observed SLP (solid) and Korean temperature (dashed line). (b) Correlation pattern between observed AO index at lead month two and observed SLP in January. The significance levels are shown with different shading as indicated on the right side.

양으로부터 고온다습한 공기가 유입되어 한반도의 기온은 증가하게 된다. 이런 관계를 통해 1월 기온과 선형하는 AO가 서로 역학적으로 연결되어 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 2는 4월 한반도 기온과 해면기압의 첫 번째 SVD모드와 1월 해면기압과 11개월 선형하는 SOI의 상관관계수 공간분포도를 나타낸다. 해면 기압의 주요 시그널은 티베트 고원 주변에서 음의 부호가 나타나고 시베리아 지역에서 일본까지 양의 부호가 나타났다(Fig. 2a). 이러한 패턴은 시베리아 지역의 대륙 고기압이 한반도 지역까지 확장됨으로써 차가운 공기가 한반도까지 이류 되어 한반도의 전 지역의 기온이 낮아진다. 실제 Fig. 2c에서 한반도 기온 패턴은 전 지역에 걸쳐 음의 값이 나타난다. 그러나 그 값의 크기는 한반도 서쪽 지역보다 동쪽 지역에서 더 크게 나타난다. 이러한 차이는 동해안의 기온 변동이 편향상에 강하게 영향 받는다는 것을 의미한다. 해면기압과 선형하는 SOI는 시베리아 지역과 한반도 지역에서 양의 상관관계를 가지고 티베트 고원 지역에서 강한 음의 상관관계를 가진다. Fig. 2a와 Fig 2b에서 주요 시그널의 패턴이 매우 유사하다. 이는 11개월 전 양의 SOI가 시베리아 지역에서

일본 지역까지 해면기압의 양의 편차 값을 유도하였고, 티베트 고원 지역에서는 해면기압의 음의 편차 값으로 유도하였다. 따라서 대륙 고기압이 한반도까지 확장하여 한반도의 기온을 낮게 한다.

6월 한반도 기온과 해면기압의 첫 번째 SVD모드에서 해면기압의 주요 시그널은 중국 대륙에서 양의 부호가 보이고 오호츠크 해에서 음의 부호가 보인다(Fig. 3a). 중국 대륙과 한반도에 고기압이 자리하고 있어 한반도 전 지역의 기온은 양의 부호를 가진다(Fig. 3c). Fig. 3b는 6월 해면기압과 이보다 2개월 앞 선 ESL의 상관관계수 공간분포도를 나타낸다. 중국 지역에서 1% 이상 유의한 양의 상관관계가 나타나며 오호츠크 해 지역에서 음의 상관관계가 나타난다. 이것은 2개월 전의 양의 ESL에 의해 중국 대륙에 양의 편차가, 오호츠크 해에 음의 편차가 되어 한반도 기온을 높게 한다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 12월 한반도 기온과 해면기압 사이의 첫 번째 SVD모드와 12월 해면기압과 12개월 전 NAO의 상관관계수 공간분포도를 나타낸다. 해면기압 패턴은 1월 SVD분석 결과와 같은 분포로 부호만 서로 다르고 겨울철 평균적인 기압분포와 같은 패턴을 보여준다(Fig.

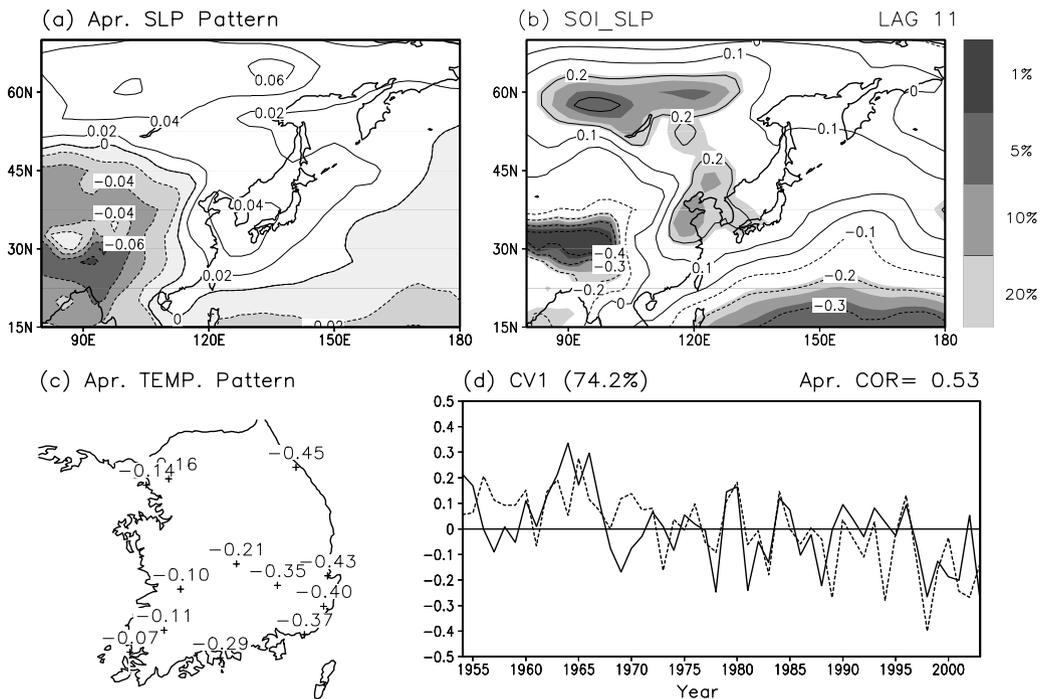


Fig. 2. Same as Figure 1 except for SLP and Korean temperature in April and SOI at lead month eleven. The SVD mode explains 74.2% of total covariance.

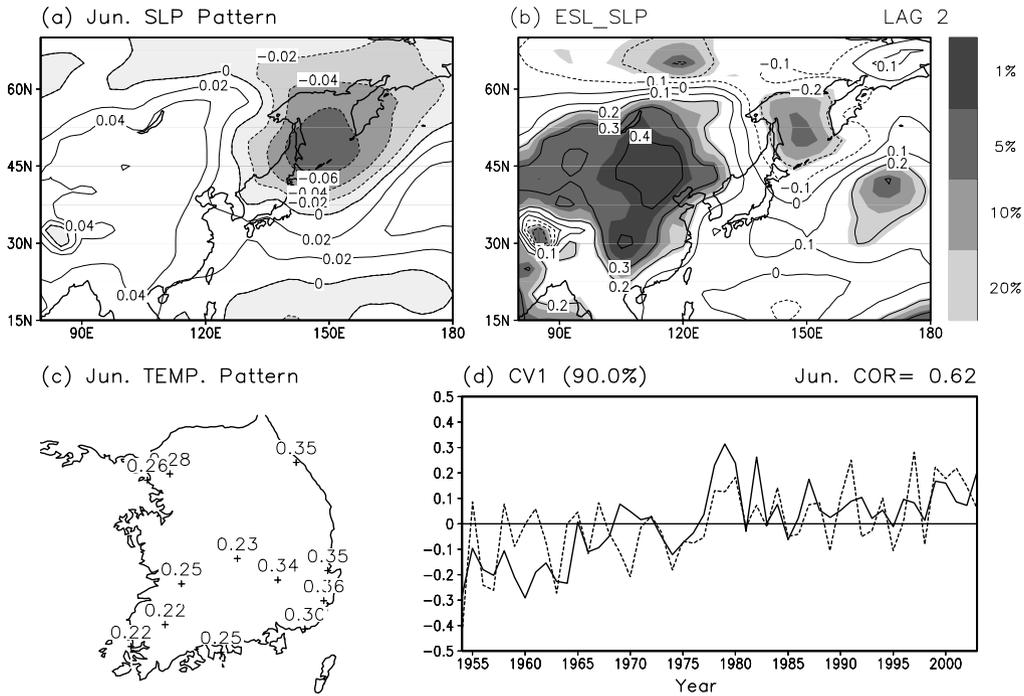


Fig. 3. Same as Figure 1 except for SLP and Korean temperature in June and ESL index at lead month two. The SVD mode explains 90.0% of total covariance.

4a). 1월 SVD 분석과는 반대로, 시베리아 지역의 고기압이 확장되어 해양으로부터 온난이류의 유입을 차단하고 한반도에 한랭이류가 유입되어 기온이 낮아진다 (Fig. 4c). Fig. 4b에서 중국대륙에 양의 상관관계가 보이고, 북서 태평양에 음의 상관관계가 보인다. 이것은 12개월 전 NAO가 한반도 주변의 기압 편차를 동서로 유도하여 한반도 기온은 감소하게 한다는 것을 뜻한다.

3.2 강수량

Table 5와 6은 한반도 강수량과 기후지수의 지연 상관관계수가 각각 5%, 1%이상 유의한 선행시간을 나타낸다. 8월, 9월, 11월 그리고 12월의 한반도 강수량과 지연상관관계에 있는 기후지수의 종류가 다양하다. 특히 남방진동과 관련된 기후지수들은 11월과 12월에 연속적으로 지연되어 나타나는데, 대부분 음의 상관관계에 있다. 즉, 엘니뇨가 발생 하면, 겨울철 강수량이 증가한다. 차은정 등(1999)은 가을철에 엘니뇨가 시작하면 겨울철 강수량이 평년보다 많아진다고 제시하였다. 그러나 장마가 시작되는 6월과 장마가 진행 중인 7월의 강수량과 지연 상관관계에 있는 기후지수들의 종류가 적

다. 왜냐하면 한반도에 장마가 시작되는 시간규모와 기후지수의 시간규모가 서로 다르기 때문이다. 또한, 7월 한반도 강수량은 국지적인 강우가 잦으므로, 대규모 기후지수와 규모차이로 인해 그 관련성이 적게 나타난다.

본 연구에서는 한반도 강수량과 지연 상관관계에 있는 기후지수들이 한반도 주변 대기 순환장과 역학적으로 어떻게 연결되어 있는지 확인해보았다(Fig. 5~8). 그 예로, 3월 강수량과 9개월 이전의 NAO, 7월 강수량과 5개월 이전의 ESL, 10월 강수량과 4개월 이전의 AO, 그리고 12월 강수량과 2개월 이전의 ESL을 선택하였다. 왜냐하면 기후지수들이 한반도 강수량과 5%이상 유의한 지연 상관관계를 가지고 있기 때문이다 (Table 5, 6).

Fig. 5는 3월 한반도 강수량과 해면기압 사이의 첫 번째 SVD모드와 3월 해면기압과 9개월 선행하는 NAO의 상관관계수 공간분포도를 나타낸다. SVD의 해면기압 패턴은 티베트 지역에 양의 부호가 보이고, 북서 태평양 지역에 음의 부호가 보인다. 이런 패턴은 중국 대륙에 위치한 고기압이 한반도까지 확장되어 건조한 공기의 유입으로 한반도 강수량을 감소시킨다. 실제로 Fig. 5c에서 나타난 것처럼 한반도의 전 지역의 강수량

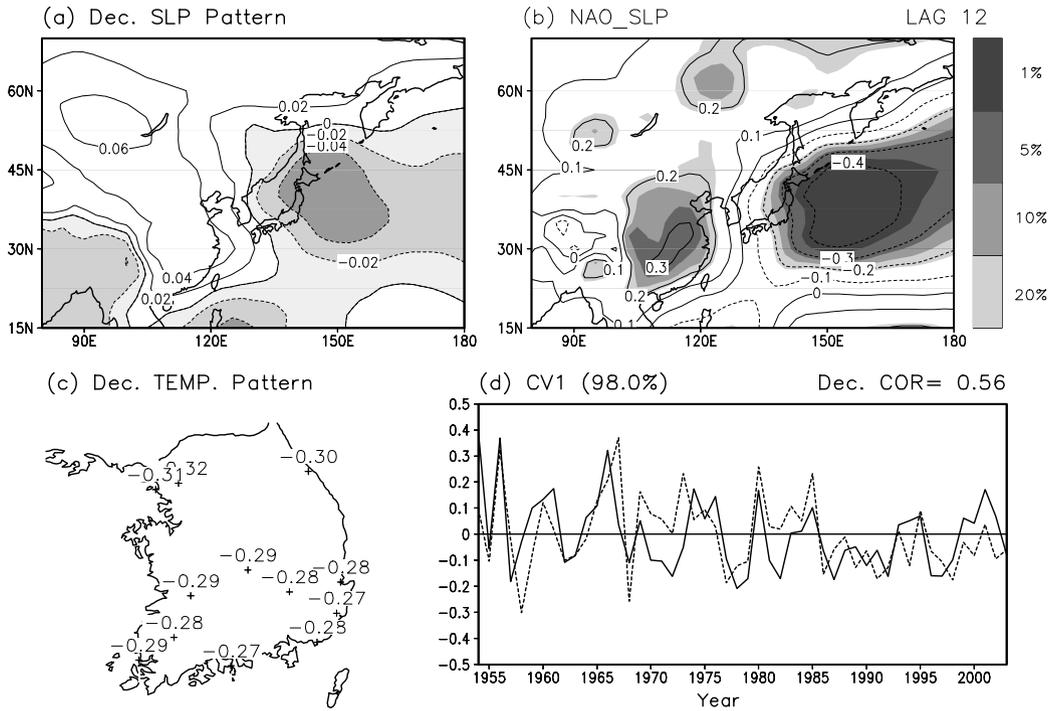


Fig. 4. Same as Figure 1 except for SLP and Korean temperature in December and NAO at lead month twelve. The SVD mode explains 98.0% of total covariance.

Table 5. Lag months of correlation coefficient between climate indices and Korean precipitation over 5% significant level. The bold and inclined characters represent a negative correlation.

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AMO								0, 4, 6, 7, 10, 11	4, 6, 7			
AO	0	0			8		1, 4		4	4	7	
ESL	7			4~7		6	5		1, 2, 11		0~2	7, 8
ESO				3, 5, 7				1~3	2, 3		0, 4	4, 5, 7
GML								3, 5, 7, 8, 11, 12				
ISL								2, 3, 9				
MEI								4	2			5, 6
NAO	9	0, 9	1, 4			2	1, 4, 11			1	2	1
NOI								1	0, 12	6		2
ONI				1~4				0, 1, 4			5	7
PDO		0	0	12				0	1			4
PNA			4			0			6			
SOI								0, 2, 5	0, 2~4		0, 2, 3, 6	0, 7
SWM	5		0	10					2, 8	7		
TNA				2, 3, 5		11		0	6	9~10		
TSA					7, 8, 10						5, 12	4, 5, 11
WHW				1				1~4	10		12	
WPO		0, 1, 10						9	7	0, 7		

은 음의 부호이다. 이 SVD 모드는 전체 변동에 80.7%를 설명하며, 두 시간계수 사이의 상관계수는 0.47이다

(Fig. 5d). Fig. 5b를 보면 중국 대륙에 약한 음의 상관관계가 나타나고 오호츠크 해 지역에 강한 음의 상관관계

Table 6. Lag months of correlation coefficient between climate indices and Korean precipitation over 1% significant level. The bold and inclined characters represent a negative correlation.

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AMO												
AO		5							10			
ESL			1, 3, 8								4	0~4
ESO			1					0	0, 1		1~3, 5	0~3, 6
GML								0~2, 4, 6, 9, 10				
ISL								0, 1	0, 4		1	1
MEI								0~3	0, 1		0~4	0~4
NAO						6						
NOI				7		0					0, 5	
ONI								2, 3	0~3		0~4	0~6
PDO									0			1, 2
PNA	0	0					12					
SOI								3	1		1, 4, 5	1~4
SWM										12		
TNA												
TSA												
WHW								0				
WPO	0			0	0, 5							

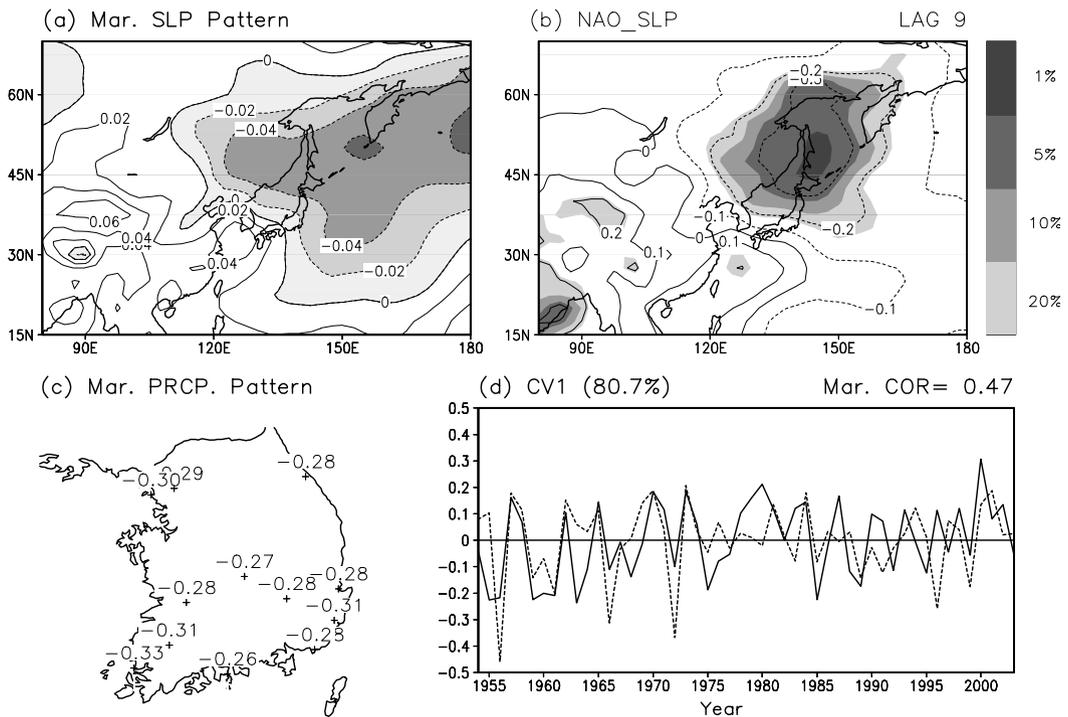


Fig. 5. Same as Figure 1 except for SLP and Korean precipitation in March and NAO at lead month nine. The SVD mode explains 80.7% of total covariance.

가 나타난다. 이것은 9개월 전의 양의 NAO가 중국대륙에 위치한 고기압과 오호츠크 해 주변에 저기압을 강화

시켜 한반도로 건조 공기를 유도하여, 강수량을 감소시킨다. Fig. 6은 7월 한반도 강수량과 해면기압 사이의

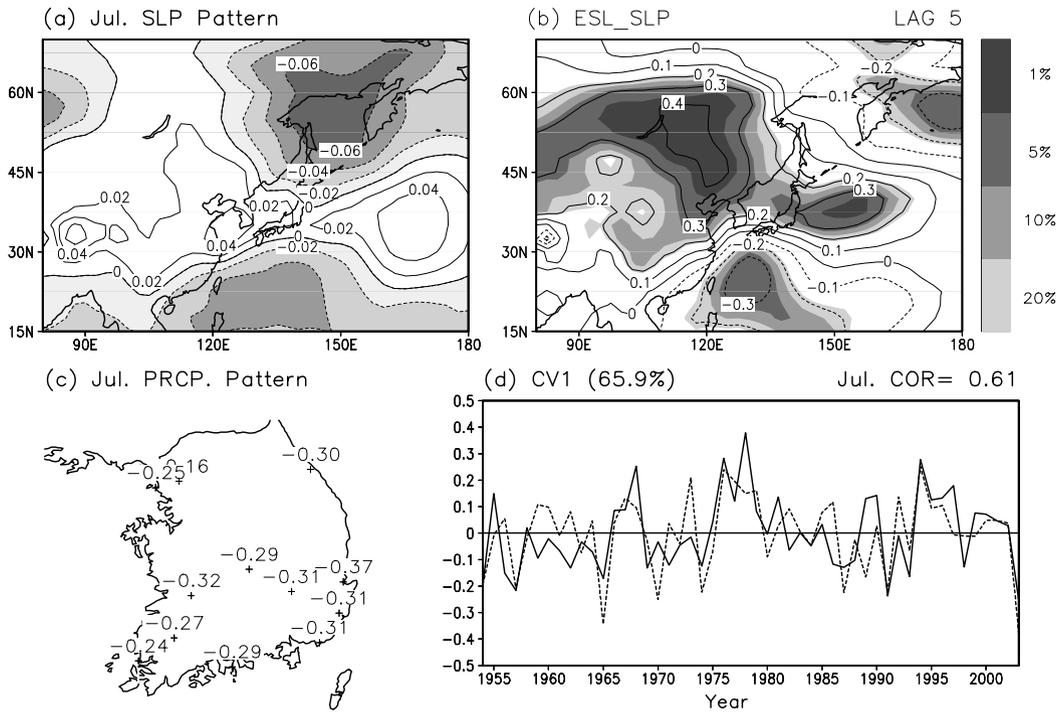


Fig. 6. Same as Figure 1 except for SLP and Korean precipitation in July and ESL index at lead month five. The SVD mode explains 65.9% of total covariance.

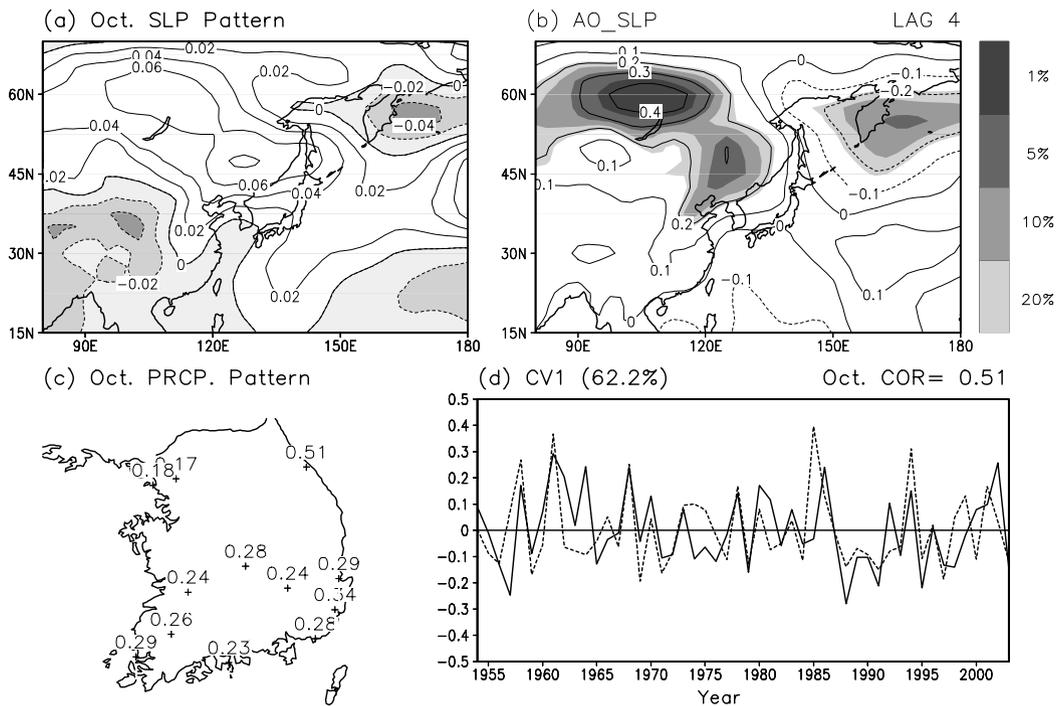


Fig. 7. Same as Figure 1 except for SLP and Korean precipitation in October and AO index at lead month four. The SVD mode explains 62.2% of total covariance.

첫 번째 SVD모드와 7월 해면기압과 5개월 선형하는 ESL의 상관계수 공간분포도를 나타낸다. 해면기압의 주요 시그널은 티베트 고원과 한반도를 포함한 동아시아 대륙과 북서 태평양에 양의 부호가 보이고, 오호츠크 해와 동중국해에서 음의 부호가 보여 동서-남북 대비 패턴이 나타난다(Fig. 6a). 이러한 패턴은 대륙 고기압이 확장되어 해양으로부터 유입되는 온난 습윤한 공기의 유입을 막아 한반도의 강수량은 감소하게 된다(Fig. 6c). Fig. 6b에서 한반도 북쪽지역과 북서태평양 일부 지역에 5%이상 유의한 양의 상관관계가 나타나고 한반도 남쪽지역에 5%이상 유의한 음의 상관관계가 나타난다. 해면기압 패턴과 상관계수 공간분포도는 오호츠크 해 지역을 제외한 나머지 지역에서 그 패턴이 유사하게 나타난다. 이것은 5개월 전의 ESL이 한반도 주변에서 해면기압의 편차를 동서-남북 패턴으로 유도하므로, 한반도 강수량은 감소하게 된다.

Fig. 7은 10월 강수량과 해면 기압의 첫 번째 SVD모드와 10월 해면기압과 이보다 4개월 앞선 AO의 상관계수 공간분포도이다. 5%이상 유의한 양의 상관관계가

시베리아 지역에서 한반도 북쪽에 걸쳐 위치하고, 캄차카 반도 주변에 음의 상관관계가 나타난다. 이러한 상관패턴은 한반도에 해양의 수증기의 유입이 유리하도록 하는 해면기압을 의미하며, 첫 번째 SVD 결합 모드의 해면기압 패턴과도 유사하다. 좀 더 자세한 내용은 Kim *et al.*(2007)의 논문을 참조 바란다.

Fig. 8은 12월 강수량과 해면기압 사이의 첫 번째 SVD모드와 12월 해면기압과 이보다 2개월 앞선 ESL의 상관계수 공간분포도를 나타낸다. 해면기압의 주요 시그널은 중국 지역에 양의 부호가 보이고, 북서태평양과 오호츠크 해 전역에 음의 부호가 나타난다(Fig. 8a). 이러한 패턴은 대륙의 고기압이 강화되고 알류산 저기압이 강화되어 한랭 건조한 공기의 유입이 많아져 한반도 강수량이 적어진다(Fig. 8c). Fig. 8b에서 남동중국을 중심으로 중국 대륙 전역에 강한 양의 상관관계가 나타나고, 북서태평양 전역에 음의 상관관계가 나타난다. 2개월 전의 양의 ESL이 한반도 주변의 해면기압 편차를 유도하고 이 때 한반도가 건조해지기에 좋은 조건을 제공한다.

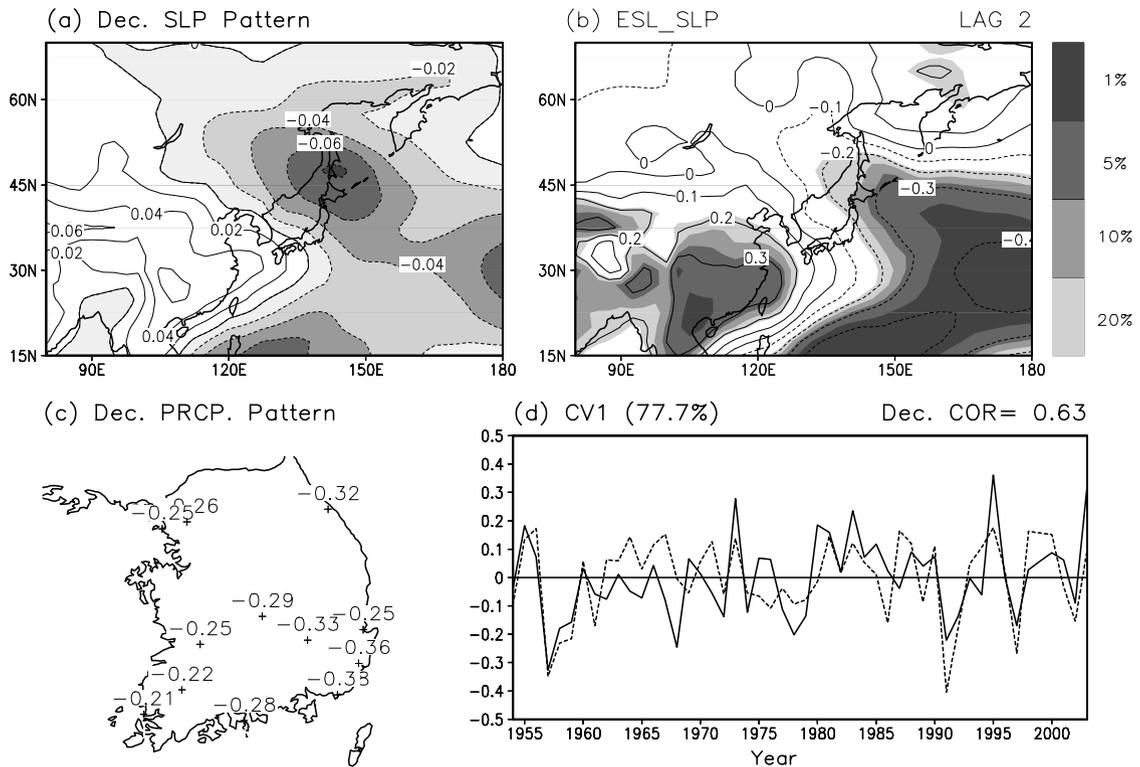


Fig. 8. Same as Figure 1 except for SLP and Korean precipitation in December and ESL index at lead month two. The SVD mode explains 77.7% of total covariance.

4. 결론 및 토의

이 연구에서는 장기예측의 예측인자로 활용할 수 있는 기후지수들을 종합적으로 고찰하기 위하여 한반도 월평균기온 및 강수량에 영향을 주는 18개 광역규모 기후지수들을 조사하였다. 또한 각 기후지수들이 어느 정도의 시간지연을 두고 연관되어 있는지를, 어느 정도의 유의수준에서 연관되어 있는지를 제시하였다. 아울러 각 기후 지수들이 한반도 주변의 대기 순환을 어떠한 패턴으로 변화시키는지에 대한 것도 몇몇 예를 통하여 제시하였다.

한반도 기온 및 강수량은 다양한 기후변동 시그널을 대변하는 다양한 기후지수들과 연관되어 있었으며, 선행하는 시간규모도 짧게는 1개월에서 길게는 12개월까지로 다양하게 나타났다. 특히, 기온의 경우 4월, 5월, 9월에서 예측인자로 활용할 수 있는 기후지수가 많았으며, 강수량의 경우 8월, 9월, 11월, 12월에서 예측인자로 활용할 수 있는 기후지수가 많이 나타났다. 1월 기온은 1월 이전의 AO, NAO, WPO의 변동과 밀접한 관련을 보였다. 예를 들어, 1월보다 2개월 이전의 AO는 1월 한반도 기온과 1%이상 유의한 양의 상관관계를 가지고 있고, 한반도 주변 해면기압과도 유의한 관계에 있다. 이러한 결과는 임은순과 안중배(2004)가 제시한 AO의 변동이 시간지연을 두고 한반도 기온에 통계적으로 가장 유의한 영향을 미친다는 것과 일치한다. 2개월 전의 양의 AO는 시베리아 지역의 고기압과 오호츠크 해 주변의 저기압을 약화시켜 한반도에 한랭이류가 유입되는 것을 저지시켜, 한반도 기온은 높아진다. 12월 강수량은 ENSO와 관련된 지수(ESL, ESO, MEI, ONI, SOI)와 유의한 지연상관관계에 있다. 예를 들어, 12월보다 2개월 이전의 ESL은 12월 한반도 강수량과 1%이상 유의한 음의 상관관계에 있으며 한반도 주변의 대기 순환장과도 밀접한 관계에 있다. 2개월 전의 양의 ESL은 중국대륙의 고기압을 강화시켜 해양으로부터 습윤한 공기의 유입을 막아 한반도 강수량을 감소시킨다. 보다 상세한 월별 예측인자의 활용에 대해서는 유의수준 1%와 5%를 제시한 Table 3~6을 참조하기 바란다. 앞서 제시한 결과를 통해 한반도 기후와 선행하는 기후지수가 서로 역학적으로 연결되어 있음을 밝혔다. 이 연구에서 얻어진 결과는 광역규모 기후지수들의 변동 동향을 관찰하여 계절예측에 대한 기초정보로 활용할 수 있으며, 통계모델의 예측인자로도 활용가능하다. 그러나 이 연구에서 얻어진 기후지수와 한반도 기온 및 강수량과의

연관성은 기후변화 시나리오와 같이 먼 미래의 기후모델 자료를 활용하여 기후 예측을 할 경우에는 주의가 필요로 한다. 그 이유는 기후변화가 일어났을 경우 과거의 통계적 관계가 그대로 유지된다는 가정이 타당하지 않을 수도 있기 때문이다.

비록 현 연구에서는 다루지 않았지만, 향후에 기후 강제력의 이해와 기후 변동성의 영향력이 되먹임 되는 과정에 대한 연구가 남아 있다 (Qian and Saunders, 2003). 아울러 선행하는 대규모 기후지수들이 어떠한 과정을 통해 지역기후에 영향을 주는 지에 대한 물리적 메커니즘은 미해결의 문제로 남아 있고 이에 대해서는 기후 모델에 의한 연구가 필요하다. 비록 장기 예측에 있어서 통계모델이 계속 발전하고 심지어 역학모델보다 뛰어날 지라도 통계모델을 통해 기후 시스템의 정확한 물리적인 이해를 얻기는 어렵다. 이것은 물리적 과정의 이해를 증가시키기 위해서는 더욱 현실에 가까운 역학모델의 개선이 필요하다는 것을 의미한다. 아울러 수치모델은 지역기후보다는 광역규모의 대기순환을 더 모의할 수 있기 때문에 MOS(Model Output Statistics) 방식을 이용하여 다양한 수치모델의 광역규모 기후지수 예측자료와 관측 지역기후 정보를 함께 활용한다면 장기 예측 결과에 대한 역학적인 해석이 용이할 뿐만 아니라 계절예측이 개선될 수 있으리라 생각하며, 향후 이에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2006-4102)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김성, 박정규, 김맹기, 2005: 한반도 봄철 가뭄과 연관된 북반구 대기순환패턴의 변화. *한국기상학회지*, **41**, 571-585.
- 신성철, 김맹기, 이우섭, 2006: 극진동에 연관된 한반도 한파와 열원의 역할. *한국지구과학회지*, **27**, 302-312.
- 임은순, 안중배, 2004: 한반도 겨울철 기온 변동과 대규모 순환지수와의 상관성 분석. *한국기상학회지*, **40**, 441-452.
- 차은정, 전종갑, 정효상, 1999: 엘니뇨/라니냐 해의 우리나라 기후 특성에 관한 연구. *한국기상학회지*, **35**, 98-117.
- Barnston, A. G., and R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1083-1126.
- Blender, R., U. Luksch, K. Fraedrich, and C. C. Raible,

- 2003: Predictability study of the observed and simulated European climate using linear regression. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 2299-2313.
- Brasseur, O., 2001: Development and application of a physical approach to estimating wind gusts. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 5-25.
- Enfield, D. B., A. M. Mestas-Nuñez, D. A. Mayer, and L. Cid-Serrano, 1999: How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperature? *J. Geophys. Res.*, **104**, 7841-7848.
- _____, and P. J. Trimble, 2001: The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S.. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2077-2080.
- Gong, D.-Y., and C.-H. Ho, 2002: Siberian high and climate change over middle to high latitude Asia. *Theor. Appl. Climatol.*, **72**, 1-9.
- _____, 2003: Arctic Oscillation signals in the East Asian summer monsoon. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4066, doi:10.1029/2002JD002193.
- Hansen, J., R. Ruedy, J. Glascoe, and M. Sato, 1999: GISS analysis of surface temperature change. *J. Geophys. Res.*, **104**, 30997-31022.
- Jhun, J.-G., and E.-J. Lee, 2004: A new East-Asian winter monsoon index and associated characteristics of winter monsoon. *J. Climate*, **17**, 711-726.
- Kim, M.-K., Y.-H. Kim, and W.-S. Lee, 2007: Seasonal prediction of Korean regional climate from preceding large-scale climate indices. *Int. J. Climatol.*, **27**, 925-934.
- _____, 2008: Seasonal prediction of monthly precipitation in China using preceding large-scale climate indices. *Adv. Atmos. Sci.* (submitted)
- Qian, B., and M. A. Saunders, 2003: Summer U.K. temperature and its links to preceding Eurasian snow cover, North Atlantic SSTs, and the NAO. *J. Climate*, **16**, 4108-4120.
- Rasmusson, E. M., and T. H. Carpenter, 1982: Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with southern oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 354-384.
- Schwing, F. B., T. Murphree, and P. M. Green, 2002: The Northern Oscillation Index (NOI): a new climate index for the northeast Pacific. *Prog. Oceanogr.*, **53**, 115-139.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. part I: month-to-month variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- Wang, C., and D. B. Enfield, 2001: The tropical western hemisphere warm pool. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1635-1638.
- Xin, X., R. Yu, T. Zhou, and B. Wang, 2006: Drought in late spring of South China in recent decades. *J. Climate*, **19**, 3197-3206.
- Zhang, Y., J. M. Wallace, and D. S. Battisti, 1997: ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *J. Climate*, **10**, 1004-1020.