creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

이학석사학위논문

동아시아 가강수량과 강수량의 상관성 분석

On the spatio-temporal relationship between precipitation and the total precipitable water over East Asia

2016년 8월

서울대학교 대학원

지구환경과학부

금왕호

동아시아 강수량과 가강수량의 상관성 분석

On the spatio-temporal relationship between precipitation and the total precipitable water over East Asia

지도 교수 임 규 호

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함
2016년 4월

서울대학교 대학원
지구환경과학부
금 왕 호

금왕호의 이학석사 학위논문을 인준함
2016년 6월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

강수량(Precipitation Amount)과 가강수량(Total Precipitable Water)은 여러 물리과정으로 연계되어있다. 그 결과 시공간적 해상도의 차이와 지역적인 특징에 따라서 두 변수의 상관성은 상이할 수 있다. 본 연구에서는 동아시아 지역에서 두 변수의 상관성을 분석하기 위해 주성분 분석방법인 CSEOF 를 이용하여 두 변수의 상관성의 지역에 따른 특성을 분석하였다. CSEOF 는 두 변수의 비교의 시공간적인 상관성을 분석 할 수 있게 하며, 일반적인 EOF 방법으로 쉽게 확인하기 힘든 연변화 모드를 분석 할 수 있는 장점을 가지고 있다. CSEOF 의 특징을 감안하여 1984 년 1 월부터 2014 년 12 월까지 372 개월의 월 평균 GPCP 강수량 자료와 ERA-Interim Total Column Water Vapor 의 자료 기간 평균을 제외한 편차를 CSEOF 분석을 이용해 모드 별로 분해했다. 분해된 모드 중 다른 모드에 비해 분산설명률이 가장 큰 모드를 이용하여 상세 분석을 수행하였다. 상세 분석한 모두의 고유벡터는 기후학적인 연 변화와 거의 일치하였다. 이 고유벡터에 대응하는 PC 시계열은 연 변동성의 변화를 설명한다.

강수량과 가강수량의 PC 시계열은 모두 최근 들어 진폭과 평균이 상승하는 모습을 보였으며 각각의 PC 시계열은 상당한 상관성을 보였다. 변수들의 PC 시계열의 상관계수는 0.61 이며, 월별로 거의 일정하였다. 두 변수의 주기분석 결과, 두 변수는 모두 2-6 년 사이에서 강한 변동성을 보였다. 모드로 분해하여 두 변수를 비교한 결과 가강수량 PC 시계열의 변화가 수증기량의 공간적인 수평 경도 변화와 깊은 연관이 있었다.

수증기량의 수평경도는 수증기 선속의 수렴과 높은 상관성을 가지게 되어 강수량의 변동성과 상호작용하는 것으로 설명 가능하였다.

주요어: 가강수량, 강수량, CSEOF

학 번: 2014-20321

목 차

국문초록 i
목차 iii
그림 및 표 목차 vi
1. 서론 1
2. 자료 및 방법 4
2.1 자료 4
2.2 CSEOF 5
3. 분석 결과 6
3.1 가강수량 6
3.2 강수량 12
3.3 강수량과 가강수량의 상관성 16
4. 결론 23
참고 문헌 24
Abstract 26

그림 및 표 목차

Fig. 1 본연구의 대상 지역. 경도 110E ~ 150E, 위도 20N ~ 50N..... 6

Fig. 2 가강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 로딩벡터. (a) 12월, (b) 1월, (c) 2월..... 9

Fig. 3 가강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 로딩벡터. (a) 6월, (b)7월 (c) 8월..... 10

Fig. 4 가강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 PC 시계열. 1984년부터 2014년까지의 값..... 11

Fig. 5 강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 로딩벡터. (a) 12월, (b) 1월, (c) 2월..... 13

Fig. 6 강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 로딩벡터, (a) 6월, (b) 7월 (c) 8월..... 14

Fig. 7 강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 PC 시계열. 1984년부터 2014년까지의 값..... 15

Fig. 8 강수량과 가강수량의 첫 번째 모드 PC 시계열 비교. 최대값 대비 비율 적색 실선이 가강수량, 청색 실설이 강수량..... 17

Fig. 9 강수량의 가강수량의 첫 번째 모드의 PC산포도. x축이 강수량, y축이 가강수량의 PC값. 검은 점선은 최소 제곱 평균으로 구한 경향선..... 18

Fig. 10 가강수량(적색 실선), 강수량(청색 실선) PC 시계열의 푸리에 변환 값. 19

Fig. 11 1월(a), 7월(b)의 강수량과 가강수량 분포, 색으로 표시된 부분은 가강수량의 분포며, 등치선으로 표시된 부분은 강수량의 분포. 가강수량의

등치선 간격은 0.2, 강수량의 등치선 간격은 0.4..... 22

Table 1. 강수량과 가강수량의 CSEOF 모드별 분산 설명률 (%).....6

1. 서 론

가강수량(Total Precipitable Water)는 대기 중의 수증기가 얼마나 있는지를 나타내는 변수로, 지표면의 단위 면적 당 공기기둥이 가지고 있는 수증기량을 합산한 값이다. 물리적 의미로는 공기 기둥의 수증기가 모두 강수가 되어 내릴 경우를 가정하여 귀할 수 있는 최대 강수량을 말한다. 가강수량은 대기가 얼마나 많은 수증기를 내포하고 있는지를 알려주는 값으로, 라디오 존데를 이용한 상층 관측이 가능해진 이후에 낮은 해상도로 구할 수 있는 변수였다. 그러나 인공위성을 이용한 공기 기둥의 수증기량 측정이 가능해지고, GPS의 신호 속도가 수증기량에 의해 지연된다는 사실을 이용하여 가강수량의 값을 구하는 방법이 소개된 이후(Bevis et al. 1992) 이를 이용하여 연직측정이 가능한 GPS RO 등의 관측을 통해 가강수량 자료의 시간적, 공간해상도는 정밀해졌다.

강수량(Precipitation Amount)은 해당 기간동안 내린 총 수분의 양을 나타내는 값이다. 우리나라에서는 20세기 초부터 근대적 관측이 있었으며, 지금도 수많은 자동기상관측 장비에서 관측이 이루어지고 있다. 질량 보존 방정식을 따르면 대기중의 수증기량 자체는 강수량과 선형적으로 연관되어있지 않다. 그러나 수증기량은 수증기속에 영향을 주며, 또한 낙하하는 강수 강수는 대지의 수분 함량을 변화시켜 단기간의 수증기량 변화에 영향을 준다. 강수가 내리게 되면 대기중의 수증기량은 줄어들지만, 이는 다시 증발로 보상받게 되는 구조가 형성되어 이 관계는 복잡하다고 할 수 있다. 그렇기에 대기의 수증기량과 강수량관의 관계를 단정적으로 묘사하긴 힘들다.

많은 선행연구들은 강수량과 가강수량의 관계에 대한 연구들을 진행한 바 있다. 2002년에는 하와이 지역의 GPS관측 값을 이용하여 강수

이벤트 동안 가강수량과 강수량 사이의 양의 상관성을 조사하는 시도가 있었고,(Foster 2002) 이후에도 관련 연구들이 진행되었다.(Lu et al. 2015; Suseno and Yamada 2013; Yuan et al. 2014) 각 연구들은 높은 공간 해상도를 통한 자료를 통해서 강수량과 가강수량이 서로 연관성을 가지는 것을 확인하였으며, Suseno; Yamada 2013에서는 이를 수치모형으로 상관성을 분석하였다. 해당 선행연구에서는 가강수량과 강수량이 짧은 시간 범위에서 상관성을 가지고 있으며, 이는 가강수량이 대기의 불안정도에 영향을 주기 때문으로 보았다. 그러나 시간의 해상도가 줄어들면 줄어들수록 강수량과 가강수량의 상관성은 떨어지는 것처럼 보인다. 실제로 이들의 관계가 상관성이 떨어지는지를 확인해보려면 기후적인 값들의 비교가 필요하다.

Bordi et al. (2016)에서는 북미 6개의 지점의 강수량과 가강수량을 이용하여 SPI와 강수 효율을 비교한 연구를 진행하였다. 해당 연구에서 가강수량은 강수량과의 상관성이 크게 존재하지 않는 것처럼 보였다. 그러나 Chakraborty et al. (2016)에서는 월 평균 강수량과 관측된 가강수량의 값을 비교하여 관측된 가강수량을 이용하여 강수량을 추정할 수 있다는 결과를 얻었다. 지역에 따라서 시간 규모에 따라서 강수량과 가강수량의 상관이 동일하지 않음을. 또한 위의 연구들은 이러한 물리적 관계를 찾기 위해서 각각 새로운 변수를 도입하거나 다른 변수를 추가로 도입하는 등 추가적인 처리를 수행하였다.

본 연구에서는 가강수량과 강수량의 관계를 월 단위에서 지역적으로 분석하고자 하였다. 많은 기존의 연구들은 특정 지점의 가강수량의 값과 강수량의 값을 이용하여 연구를 진행하였다. 최근에 관측된 자료들을 분석하는 경우엔 인공위성 레이더 관측값을 이용하여 지역적으로 관측한 자료가 있지만 (Ye et al. 2014), 시간자료가 충분하지 않아서 기후값을

확인하긴 힘들다. 따라서 자료로부터 기후적인 특징을 알 수 있으며, 충분히 긴 시간이 존재하는 재분석장 관측 자료를 이용하여 동아시아 지역에서의 강수량과 가강수량의 시공간적 분포 특징과 변수 사이의 상관성을 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1자료

본 연구에서는 동아시아 지방을 대상으로 하여 연구를 수행하였다. 연구 영역은 경도 110~150도, 위도 20~50도로 설정하였다. 해당 지역은 중위도 지방이며 육지와 바다가 혼재하는 지역이다. 설정된 시간은 1984년 1월부터 2014년 12월까지 총 372개월의 기간을 분석하였다. 연구에 사용된 가강수과 강수량 자료는 계산의 용의성과 CSEOF를 수행하기 쉬운 격자화 된 자료를 사용하였다.

강수자료는 GPCP(Adler et al. 2003)의 월 평균 강수량자료를 사용하였다. 해당 자료는 지상관측자료뿐 만 아니라 위성 관측 자료를 이용하여 해양과 육지의 강수량을 모델을 이용하여 격자화 후 배포하였으며, 공간 해상도는 위 경도 모두 2.5도의 자료를 가지고 있다. 해당 연구 범위에서는 총 208개의 격자가 존재한다. 자료의 단위는 월 평균 강수량으로 mm/day를 사용하였다. 격자는 144X72이며, 관측된 자료를 그대로 격자화 한 자료이므로 가장 신뢰도가 높은 격자화 자료 중 하나라 할 수 있다. 사용한 격자 개수는 동아시아 지방 16x12개를 사용하였다.

가강수량 자료는 패턴을 분석할 만큼 충분한 해상도를 가진 장시간 관측 자료를 찾기 힘들다. 대부분의 관측 자료는 라디오 존데를 이용한 관측자료며, 해상에 관측값은 몇 개 존재하지 않는다. 현재 구할 수 있는 관측자료들은 대부분 시공간적인 측면에서 부족한 부분이 많다. 따라서 가강수량 자료는 재분석장을 이용하여 분석을 수행하였으며 사용된 재분석장은 ECMWF의 ERA-Interim (Dee et al. 2011)자료를 사용하였다. ERA interim은 1979년부터 자료가 존재하며, 현재 논문들을 통한 검증결과 가장 관측치와 비슷한 재분석장이라 할 수 있다. 또한 ERA-

Interim 자료는 다른 관측자료를 검증하는데도 사용하고 있다. 자료의 격자 간격은 0.5° 간격의 자료며 총 격자는 720 X 361개다. 실제 사용한 격자는 동아시아 지방 81X61개의 격자점이다.

2.2. Cyclostationary EOF (CSEOF)

데이터를 기저함수와 기저함수에 대응하는 Principal component의 시계열 곱으로 분해하는 EOF(Empirical Orthogonal Function)는 현재는 변수의 시공간적 관계성 분석에 자주 사용된다. Kim et al. (1996)에서 소개된 CSEOF는 자연계가 고정된 기저함수로 표현되는 EOF의 단점을 주기성을 가지는 함수로 개선하였다. CSEOF에서는 하나의 변수를 주기성(Cyclostationarity)을 가진 CSLV(CSEOF loading vectors)와 여기에 대응하는 PC(principal component)의 시계열을 기저함수들의 선형결합으로 표현한다.

$$\mathrm{P}(\mathrm{x},\mathrm{t}) = \sum_{n} A_n(x,t)p_n(t)$$

$\mathrm{A_n}(x,t)$은 CSLV에 해당하며, CSEOF는 CSLV가 주기성을 가지고 있다고 가정하기 때문에 $A_n(x,t) = A_n(x,t+d)$를 만족한다. 수식의 d는 $\mathrm{A_n}(x,t)$의 주기로 본 연구에선 각 연별로 반복되는 주기를 가진 모드를 얻기 위해서 12개월 주기를 주었다. $\mathrm{p_n}(\mathrm{t})$는 pc의 시계열이며, 해당 CSLV의 시간적 변화를 설명하는 값이다. 따라서 CSEOF의 결과는 주기적 공간패턴과 패턴의 시간적 변을 분리할 수 있다. 실제 자연 현상들은 계절의 변화에 따라 준 주기적 변화이므로, 이 방법은 시공간적 변화를 분리해서 볼 수 있다는 장점이 있다. 특히 기존의 EOF에서 쉽게 확인하기 힘든 연변화 모드의 변동을 더 쉽게 확인할 수 있다.

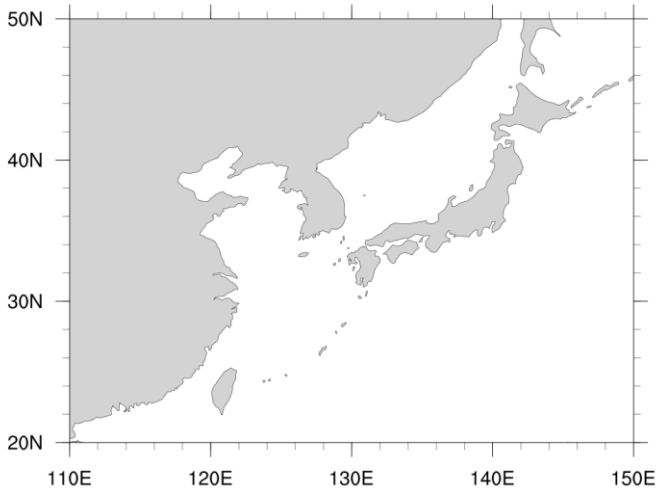

Fig. 1 본연구의 대상 지역. 경도 110E ~ 150E, 위도 20N ~ 50N

Table 1. 강수량과 가강수량의 CSEOF 모드별 분산 설명률 (%).

Mode	Total Precipitable Water	Precipitation
1	94.27	48.65
2	0.75	4.43
3	0.53	3.87
4	0.43	3.53
5	0.38	3.25

3. 분석 결과

원 자료의 지역별 30년 평균값을 제거한 후 CSEOF를 수행하여, 각 변수들을 모드별로 분해하였다. 두 변수 모두 첫 번째 모드가 다른 모드들에 비해 매우 컸다. Table 1 은 두 변수의 CSEOF 모드별 분산 설명율이다. 각 모드별 분산 설명율을 보면 가강수량은 첫 번째 모드가 94%의 분산을 설명하였으며, 강수량은 전체 분산의 48%의 값을 가졌다. 이는 일반적인 EOF에서 제거되는 연 평균 변동량이 그대로 모드에 반영되기 때문이다. 따라서 첫 번째 모드를 연 변동 모드라 할 수 있다. 첫 번째 모드를 제외한 다른 모드들은 첫 번째 모드의 10 ~ 100배 정도 작은 크기를 보여주었으며, 첫 번째 모드의 변동량이 3~10배 정도 더 크게 변수에 영향을 준다는 것을 보여준다. 따라서 가장 큰 모드인 각 변수의 첫 번째 모드들의 상관성을 분석하였다.

3.1가강수량

가강수량 첫 번째 모드의 로딩벡터는 계절의 변화를 잘 보여주었다. Fig. 2은 가강수량 로딩벡터를 그린 것이다. 겨울은 평균기온보다 작고 여름은 평균기온보다 크기 때문에 이들의 로딩벡터도 겨울에는 음수 값이 여름에는 양수 값을 보인다. 편차가 크게 나타나는 지역은 겨울과 여름에 다르게 나타났다. 겨울에는 중국 남부를 기준으로 하여 이곳에서 멀어질수록 점점 값이 값의 크기가 작아지는 것이 관찰되었다. 중국 남부는 −1.6 이하의 값을 보이며, 중심에서 떨어진 지역은 −0.9까지 떨어졌다. 여름에는 중국북부−한반도−일본 서부에 걸쳐서 넓은 양의 편차가 나타났으며, 이러한 편차는 한반도 주변에서 2 이상으로 가장 크게 나타났다. 7월의 중국 동부에 2.4 이상인 지역을 중심으로 하여 한반도와 대륙, 일본 서부에 높은 값을 보였다. 8월에는 최대값을 2.4보다 낮은 2.2정도였으며 한반도와 일본 전역, 중국 황하유역에 걸쳐

비슷한 값을 보였다. 한반도에서는 동부 태백산맥을 따라서 같은 위도보다 더 낮은 값이 관찰되었다. 또한 백두산부근과 일본의 후지산 및 산맥지대에서도 비슷한 현상이 나타나는데, 이는 대기의 수증기가 하층에 더 많이 분포하기 때문으로 생각된다. TPW의 변화의 크기도 하층에서 더 크게 일어나는데 이러한 산맥에서는 고도가 높으므로 그만큼 수증기가 없으며, 가장 변동성이 높은 지역이 사라졌으므로 상대적으로 변동이 작게 일어난다.

Fig. 4 에서 보여주는 첫 번째 모드의 PC는 연변화 1년의 진동이 많이 제거된 모습을 보여주었다. 2년 이상의 주기를 가진 진동들이 관찰이 되었으며, 그 진폭은 점점 커 지는 추세를 보인다. 극소값을 보인 시점은 1987년, 1992년, 1999년에 이고 보였고 1983년, 1988년, 1991년, 1995~1996년, 1999년에 극대 값을 보였다. 10년의 평균값을 보게 되면 PC의 값 역시 점점 커졌는데 1984년 ~ 1994년 평균은 9.88, 1994 ~ 2004년 평균은 10.05, 2004 ~ 2013년 평균은 10.27이다. 전체 평균은 10.08이다. 진폭도 커지면서 전체적인 값 역시 증가한 것이다. 로딩벡터와 함께 본다면, PC가 증가할 경우 중심에서의 편차가 증가하게 되며, 이는 전체적인 연 변동의 진폭을 크게 하는 효과를 나타낸다. 일반적으로 한반도 주변에서는 겨울에는 음의 편차가, 여름에는 양의 편차가 나타나며 PC의 증가는 연 변동의 진폭을 크게 하는 효과를 불러온다. 그러므로 PC가 커질수록 겨울에는 더 적은 양의 가강수량이 관측되는 것이고 여름에는 더 많은 양의 가강수량이 관측된다. 이러한 관점에서 볼 때, 동아시아 지역의 가강수량은 여름과 겨울의 편차가 더 커지고 있다고 말할 수 있다.

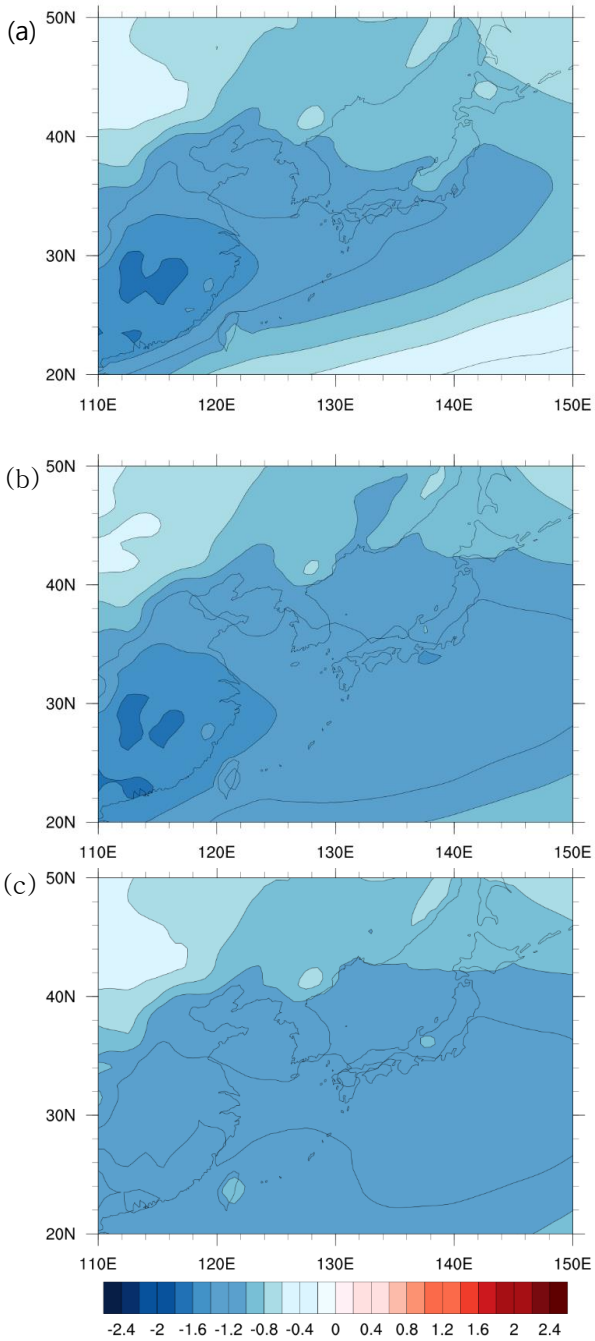

Fig. 2 가강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 로딩벡터. (a) 12월, (b) 1월, (c) 2월

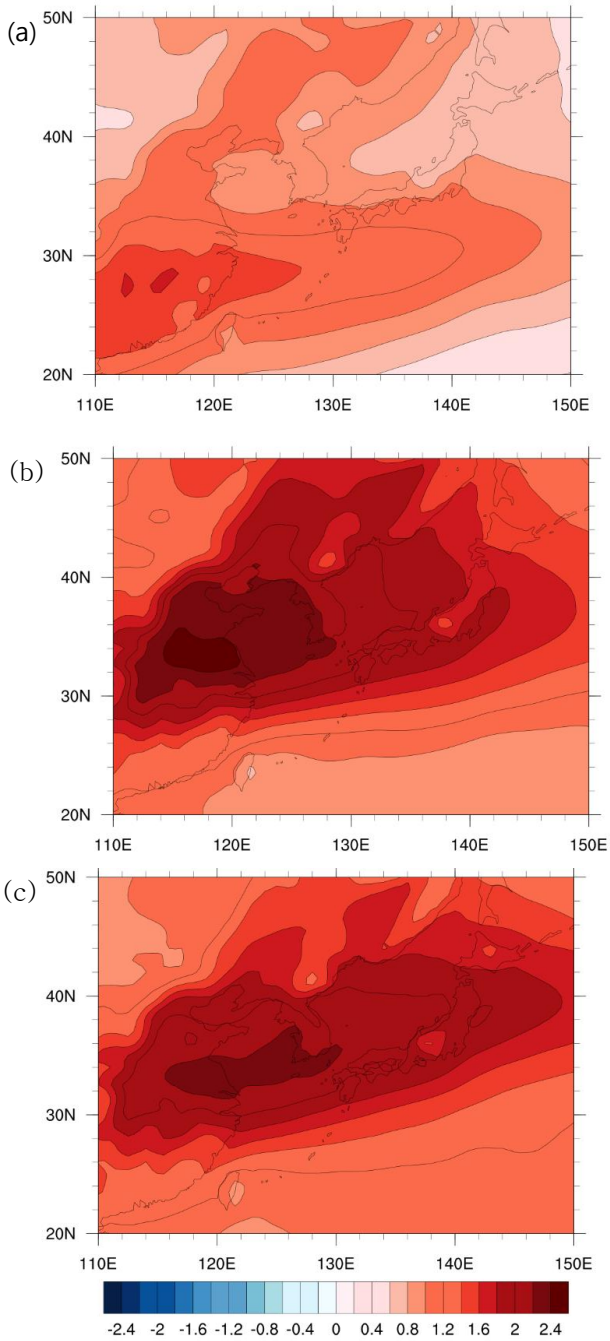

Fig. 3 가강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 로딩벡터. (a) 6월, (b)7월 (c) 8월

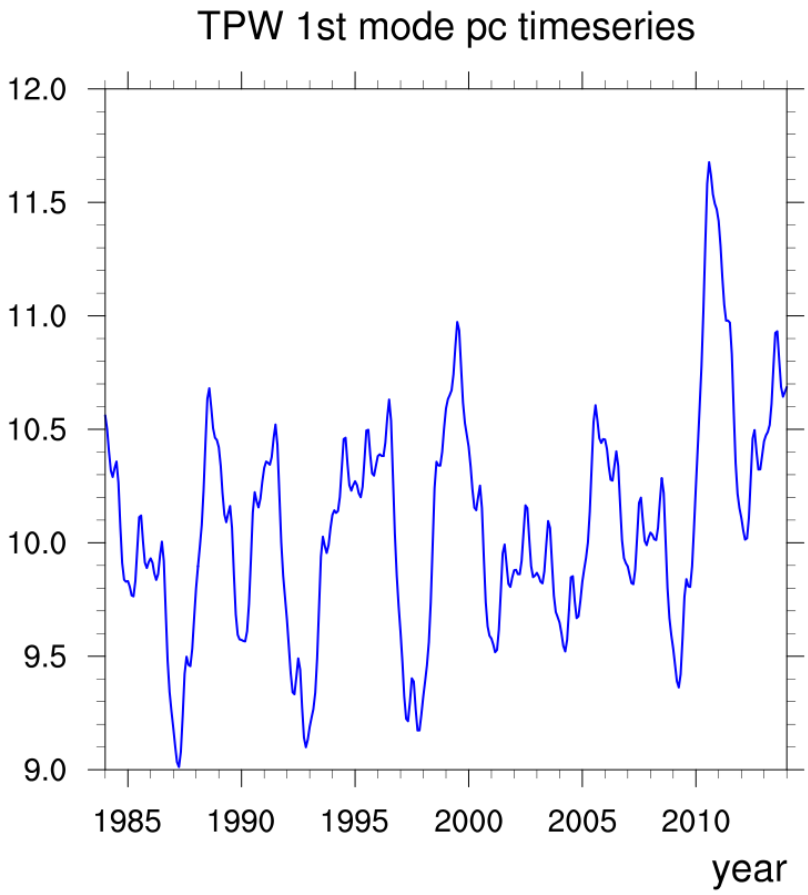

Fig. 4 가강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 PC 시계열. 1984년부터 2014년까지의 값

3.2 강수량

Fig.5. 6에서 보여주는 강수량 첫 번째 모드의 로딩벡터 역시 연 주기의 변동을 나타내는 모드다. 겨울에는 대륙지역이 아닌 섬과 해안을 따라서 큰 값을 보여주었지만 여름으로 갈수록 양극화 되면서 점차 전선을 중심으로 큰 편차를 보여준다. 한 가지 눈에 띄는 현상으로 겨울에 섬과 육지 남쪽에서 큰 편차가 나타나는 경향이 존재한다 (Fig 4 (a), (b)). 이 현상은 대만과 중국 남부, 일본 큐슈에서 나타타며, 겨울이 지나가면서 점차 사라졌다가 다시 겨울에 접어들면서 발생한다. 여름으로 갈수록 존재하던 강세 지역은 사라지고 변동성의 중심이 점차 일본열도를 따라서 생기는 장마 전선과 비슷해진다. 6월의 로딩벡터는 장마 전선을 따라서 큰 편자가 나타났으며 4월부터 있었던 중국 남부지방의 변동성의 중심은 북쪽으로 이동하였다. 7,8월은 로딩벡터 모드의 중심이 한반도 주변으로 이동하였다. 강수량의 연변동의 값이 가장 크게 보였던 계절은 한반도 부근이다. 가장 큰 변동이 있었던 계절은 7월이며 정규화 된 로딩벡터의 값이 3이 넘게 나타나는 지역이 존재하였다.

Fig. 7은 강수량 첫 번째 모드의 PC시계열을 그린 것이다. 강수량의 PC시계열은 1987년, 2004년, 2007년에 작은 값을 보였으며, 1995년, 1999년, 2006년에 높을 값을 보였다. 강수량 역시 최근 들어 PC의 값이 점차 커졌다. 1984년부터 10년 평균은 1.57, 1994년부터는 1.67, 2004년부터는 1.69의 값을 나타냈으며 전체 평균은 1.64였다. PC의 크기는 계절 진동의 세기이기 때문에, 여름과 겨울의 차이는 점차 증가하고 있다. 그러나 증가한 값이 유의미하게 기존의 값보다 크다고 할 수 없기 때문에 연구 기간 동안 계절의 편차가 유의미하게 변하였다라고 할 수는 없다.

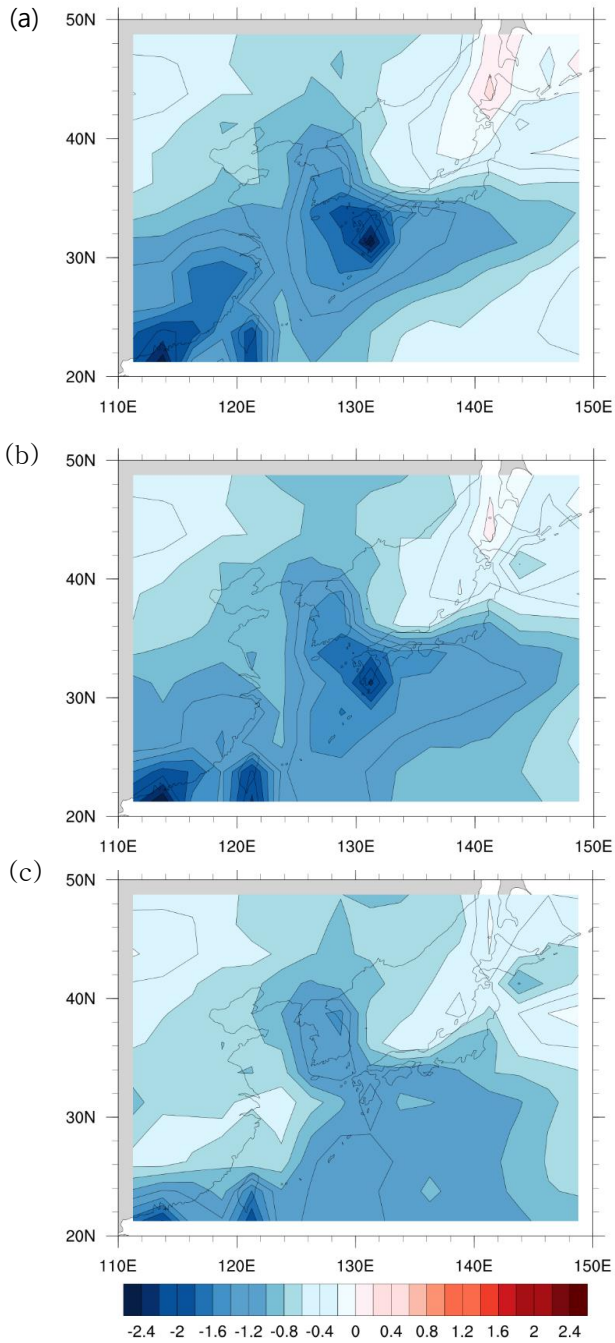

Fig. 5 강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 로딩벡터. (a) 12월, (b) 1월, (c) 2월

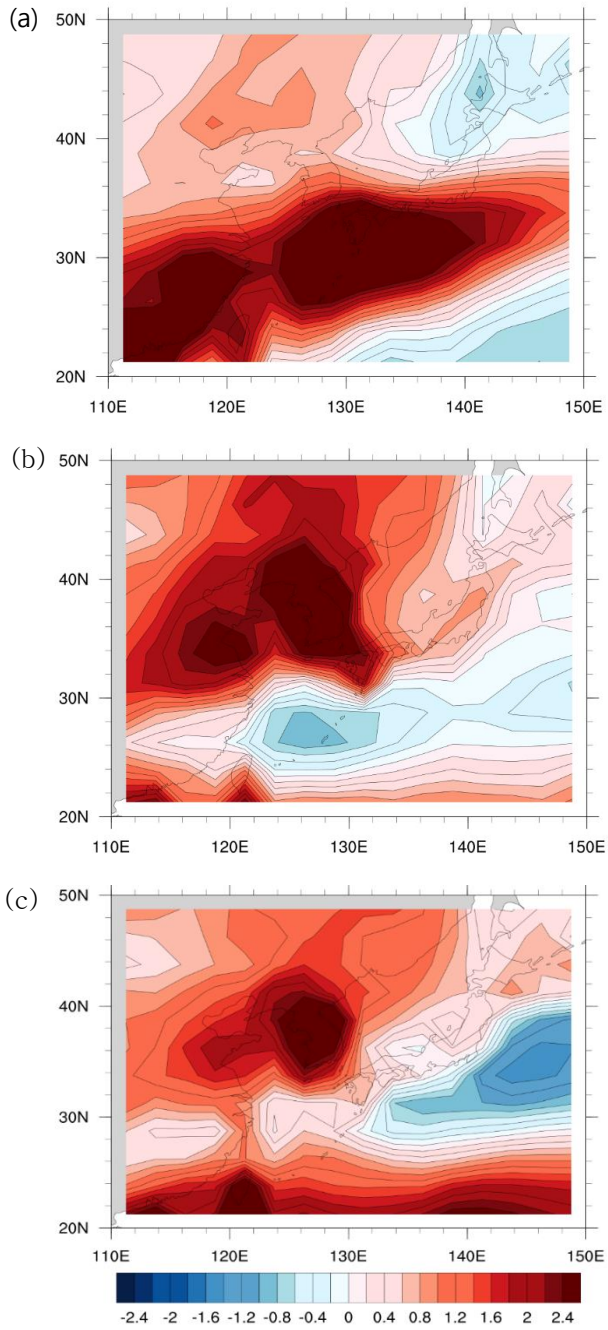

Fig. 6 강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 로딩벡터, (a) 6월, (b) 7월 (c) 8월

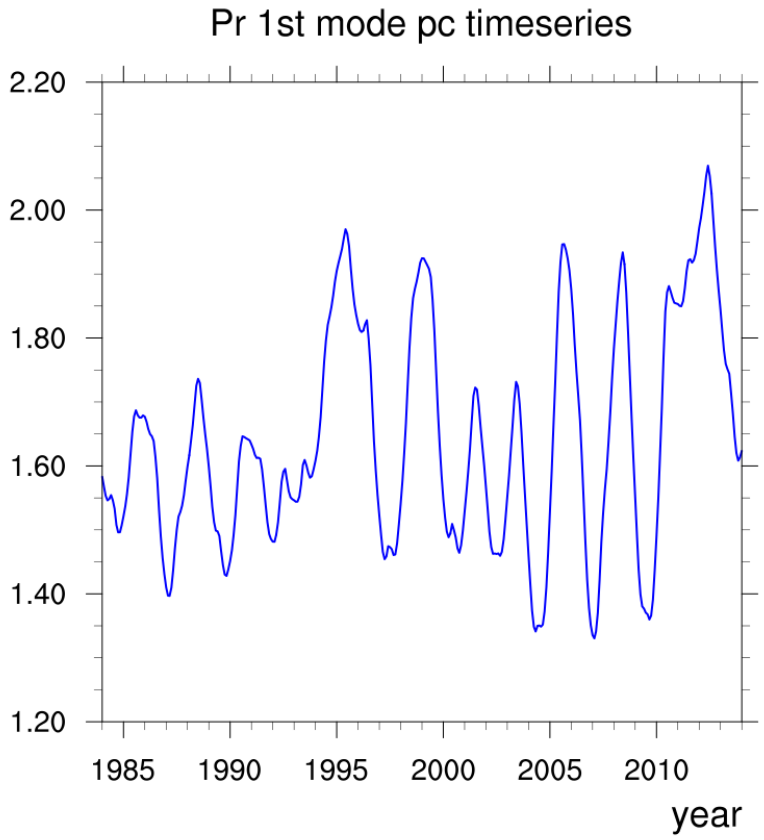

Fig. 7 강수량 CSEOF 첫 번째 모드의 월별 PC 시계열. 1984년부터 2014년까지의 값

3.3 가강수량과 강수량의 관계

Fig. 8은 가강수량과 강수량 첫 번째 모드의 PC 시계열을 비교한 것이다. 두 변수의 시계열 값은 크기의 차이가 많이 나기 때문에 변동 보이기에 각 변수의 최대값을 나누어 최대가 1이 되도록 만들었다. 원래 PC를 가지고 만든 두 변수의 상관계수는 0.61이다. 두 변수의 상은 거의 일치 했으며, 증감패턴이 비슷하게 나타났다. 일부 기간에서는 패턴이 제대로 대응되지 못하는 경우가 생기는데 대표적인 기간이 2012년이라 할 수 있다. 그러나 대부분의 경우 편차가 큰 기간에는 서로의 PC 시계열이 상당히 비슷한 모양을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 가강수량과 강수량 PC의 산포도로 그린 것이다. y축은 가강수량의 PC이며, x축은 강수량의 PC를 나타낸다. 산포도 상에서 PC의 결정계수 R^2는 0.379이며, 퍼져있긴 하지만 양의 상관관계를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 값이 퍼져서 나타나는 이유는 강수량이 가강수량의 값으로만 통제되지 않기 때문으로 생각된다. 위의 상관관계로부터 가강수량의 PC가 높을수록 강수량의 PC가 큰 값을 보이는 경향이 있다고 말할 수 있다.

Fig. 11은 두 변수의 PC 시계열을 푸리에 변환을 한 그림이다. EOF를 수행할 때 보통은 월별 기후평균값을 제거하는데, 이는 EOF를 수행하면 PC상에 1년 주기가 매우 크게 나타나게 되어 1년 주기의 변화를 관찰하기 힘들다. 또한 하나의 로딩벡터가 1년을 계속 설명하는 것은 중위도 지방처럼 지배적인 기단이 바뀌는 지역과는 잘 맞지 않는다. CSEOF에서는 1년 주기의 대부분이 로딩벡터상으로 표현되며, 따라서 1년의 주기는 줄어들고 그 이상의 주기들이 크게 나타는 현상이 보인다. 두 변수는 모드 2-3년사이에 피크가 나타났으며, 강수량은 3.5, 6년에 피크가, 가강수량은 5년에 피크가 나타났다. 전체적으로 이들의 주기는

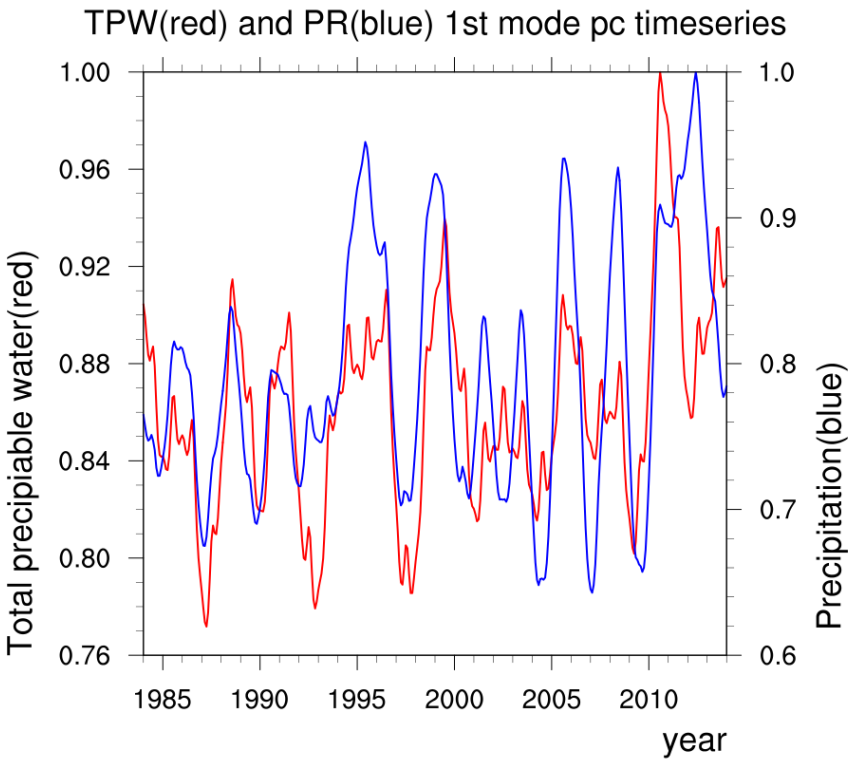

Fig. 8 강수량과 가강수량의 첫 번째 모드 PC 시계열 비교. 최대값 대비 비율 적색 실선이 가강수량, 청색 실설이 강수량.

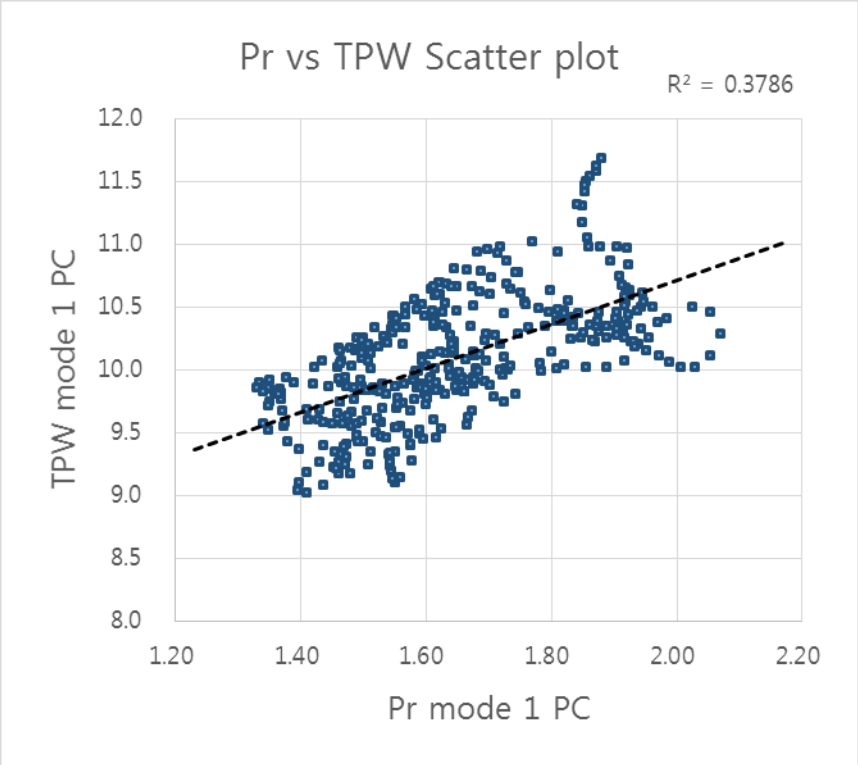

Fig. 9 강수량의 가강수량의 첫 번째 모드의 PC산포도. x축이 강수량, y축이 가강수량의 PC값. 검은 점선은 최소 제곱 평균으로 구한 경향선

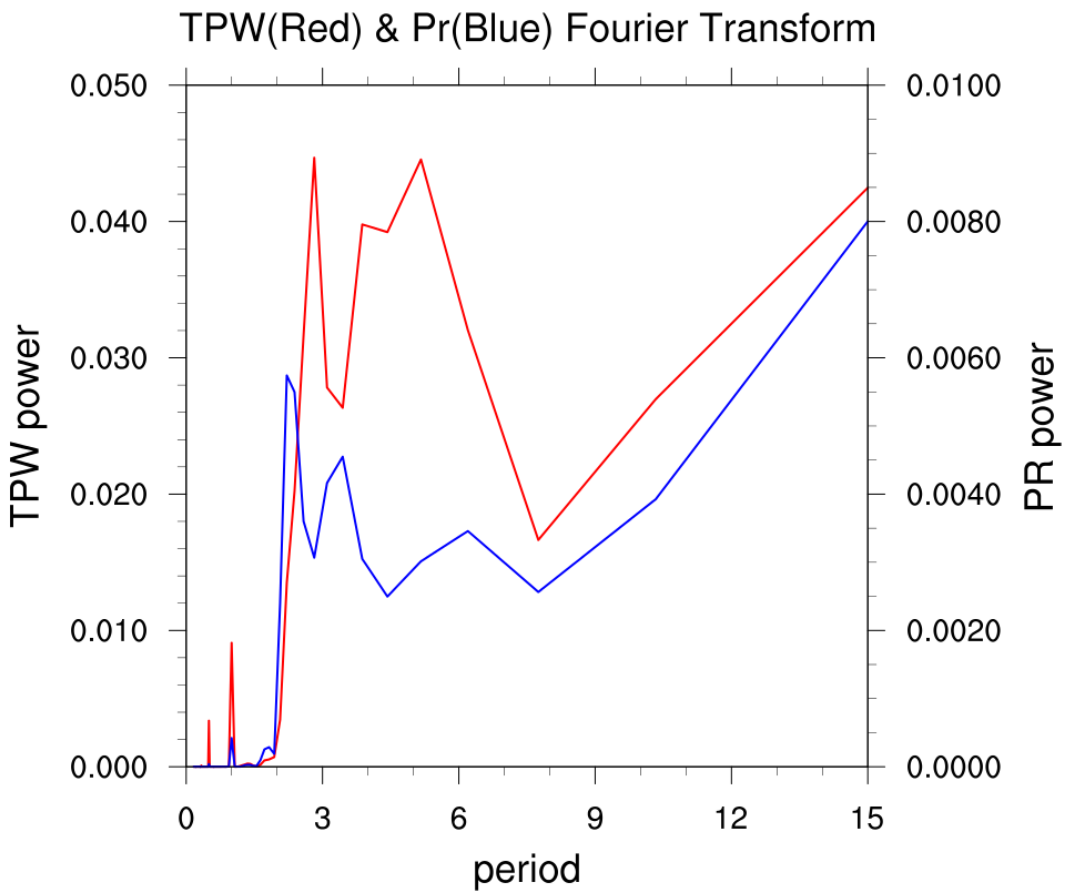

Fig. 10 가강수량(적색 실선), 강수량(청색 실선) PC 시계열의 푸리에 변환 값.

잘 맞는다 할 수 있었다.

강수량과 가강수량의 상관관계를 비교했던 Bordi et al. (2016)과는 다르게 모드간의 비교를 할 경우 강수량과 가강수량 모드 사이의 상관계수가 월별로는 크게 변하지 않는다. 선행연구에서는 관측치들을 이용하여 상관성을 구했고, 본 연구에서는 모드 사이의 상관성을 구했다는 것이 차이점인데, 이는 모드로 비교할 때에는 일정한 상관성이 유지된다는 것을 의미한다.

강수량이 가강수량과 가지는 관계성을 생각해본다면 실제 가강수량은 강수를 내리게 해주는 필수적인 조건이긴 하지만, 수증기 보존 방정식상에서는 직접적인 연관을 가지고 있지 않다. 실제로도 지역적으로 순간적인 절대값이라 할 수 있는 수증기량보다는 수증기속의 수렴이 강수에 더 직접적으로 영향을 준다. 짧은 시간 단위에서 수증기량의 증가가 강수량과 연관되는 이유는 수증기속의 수렴으로 인해 지역적인 수증기량이 증가했기 때문이며 수증기량이 증가한 만큼 수증기속의 수렴도 커졌다고 할 수 있다.

그러나 시간 해상도가 낮아지게 되면 짧은 주기를 가지고 있는 수증기속의 수렴과 가강수량의 상승과정이 모두 평균되어 사라진다. 그러므로 큰 시간단위에서 수증기량의 절대값인 가강수량이 강수량과 직접적으로 연관이 있다고 말하기 힘들다. 그러나 어느 정도 충분한 기간 동안에 대해서는 수증기 계를 정적 평형상태라 놓고 볼 수 있다.

정적 평형상태에서 수증기 질량 보존 방정식은 다음과 같이 전개할 수 있다. 우선 수증기 질량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\mathrm{Dq}}{\mathrm{Dt}} = E - C$$

해당 방정식은 오일러리안 좌표계로 표현하면 $\frac{\partial q}{\partial t} + \boldsymbol{v} \cdot \nabla q + q\nabla \cdot v = E - C$로 표현할 수 있으며, 이를 평균류 편차로 분할하고 압력 좌표계로 변환할 경우 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\boldsymbol{v} \cdot \nabla_p q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} - \nabla_p \cdot \overline{\left(q' \ \boldsymbol{v}'\right)} - \frac{\partial}{\partial p}\overline{\left(q' \ \omega'\right)} + E - C$$

이때 매우 작은 ω를 가정하고, 충분히 큰 시공간규모를 가지는 상황 속에서 정적 평형상태의 수증기장의 겨우 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E - P = \overline{\nabla \cdot (q\mathbf{v})} - E_0$$

방정식을 요소별로 나누면 다음과 같다.

$$-P = q\nabla \cdot v + v \cdot \nabla q - (E - E_0)$$

대기를 비압축장으로 본다면 $\nabla \cdot v = 0$이 되며

$$P \approx -v \cdot \nabla q + (E - E_0)$$

위의 관계가 유도된다.

따라서 가수량은 수증기량의 수평경도에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 앞서 언급했듯 절대적인 수증기량이 방정식 상에서는 직접적으로 강수량으로 연결되지 않는다. 그러나 고정된 로딩벡터를 가진 모드의 경우에는 연결 시킬 수 있다. PC의 증가에 따라 해당 모드로부터 복원된 수증기량의 수평경도가 증가한다. 위의 방정식에서 수평경도가 큰 지역에서 강수량이 늘어나는 것을 설명할 수 있다. Fig. 11을 보면 가장 큰 강수량의 변동은 가강수량 변동의 중심이 아니라 경계지역에서 발생하는 것을 확인할 수 있으며 이를 위의 식을 이용하여 해석 할 수 있다. 이는 기존에 알려진 강수이론과 상충되지 않으면서 두 변수가 상관성을 가지는 이유를 설명할 수 있다.

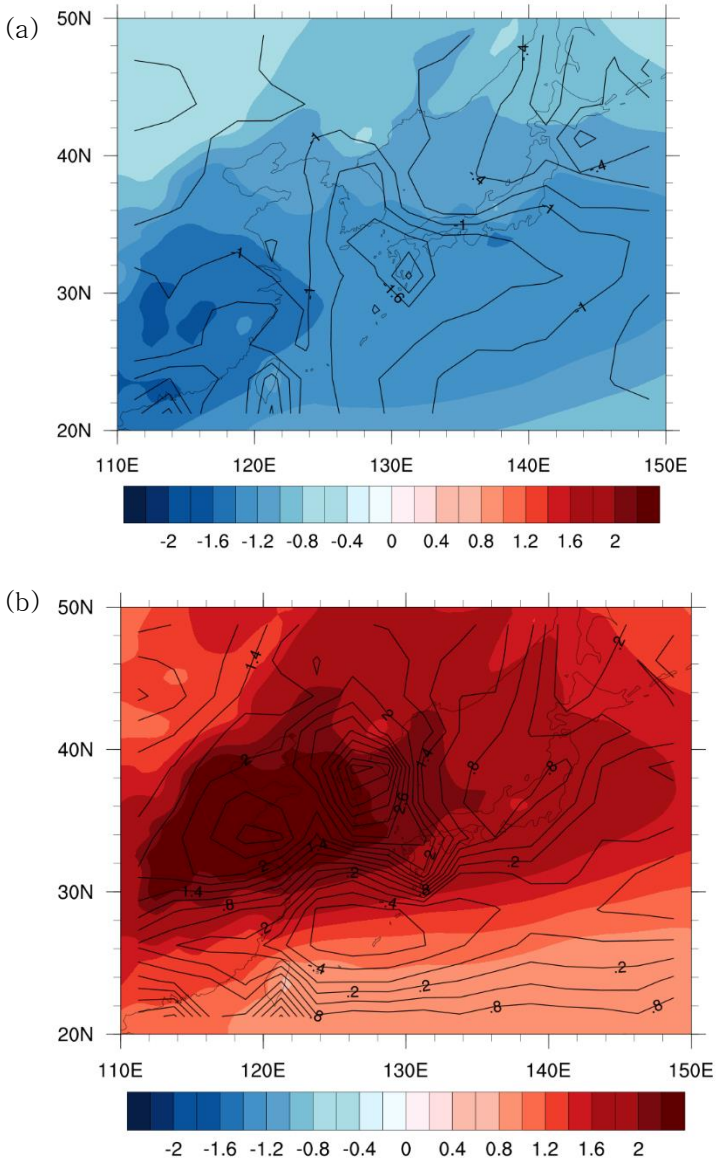

Fig. 11 1월(a), 7월(b)의 강수량과 가강수량 분포, 색으로 표시된 부분은 가강수량의 분포며, 등치선으로 표시된 부분은 강수량의 분포. 가강수량의 등치선 간격은 0.2, 강수량의 등치선 간격은 0.4

4. 결 론

본 연구에서는 동아시아 지역의 강수량과 가강수량을 CSEOF 를 이용하여 변수를 각각의 모드로 분해한 후, 이들의 상관성을 조사하였다. 첫 번째 모드의 크기가 다른 모들에 비해서 확연하게 크기 때문에 첫 번째 모드끼리의 관계를 비교하였다. 그 결과 가강수량, 강수량 모두 첫 번째 모드는 계절에 따라 진동을 나타내는 모드가 나타났으며 두 모드의 PC 시계열 사이에는 양의 상관 관계가 있다. 양의 상관관계가 나타나는 이유로 본 연구에서는 가강수량 모드에 의한 수증기량 수평경도를 PC 시계열로 표현할 수 있고, 이것은 가강수량과 강수량 간의 관계성을 물리적으로 해석할 수 있다는 것을 보였다.

위의 결과로 가강수량과 강수량의 변화가 상당한 상관성을 가지고 있으며, 본 연구에서 사용한 방법은 가강수량과 강수량을 시공간적 변동성을 비교하는 방법으로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 선행 연구들과는 다르게 지역 전체에 대한 패턴을 연구할 수 있으며, 이들의 증감을 용이하게 파악할 수 있다. 앞으로의 연구에서도 이 점은 충분한 이점이라 할 수 있다. 그러나 가강수량과 강수량의 각 모드가 전체의 강수량을 대변하는 것은 아니며, 특히 강수의 경우 첫 번째 모드뿐 만 아니라 다른 모드들의 분산 설명율도 높지만 해당 모드들과 가강수량의 모드들의 상관성은 많이 떨어졌다. 이들이 실제로 관계성이 적은 것인지, 혹은 비선형성의 결과로 낮은 관계성을 보이는 것이지 추가로 확인해 볼 필요가 있으며, 이들의 관계를 잘 설명할 수 있는 매커니즘의 규명 역시 필요할 것이다.

참고 문헌

Adler, R. F., and Coauthors, 2003: The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J Hydrometeorol*, **4,** 1147-1167.

Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992: Gps Meteorology - Remote-Sensing of Atmospheric Water-Vapor Using the Global Positioning System. *J Geophys Res-Atmos*, **97,** 15787-15801.

Bordi, I., X. H. Zhu, and K. Fraedrich, 2016: Precipitable water vapor and its relationship with the Standardized Precipitation Index: ground-based GPS measurements and reanalysis data. *Theor Appl Climatol*, **123,** 263-275.

Chakraborty, S., A. Adhikari, and A. Maitra, 2016: Rainfall estimation from liquid water content and precipitable water content data over land, ocean and plateau. *Atmos Res*, **167,** 265-274.

Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q J Roy Meteor Soc*, **137,** 553-597.

Foster, J. H., 2002: GPS meteorology and the phenomenology of precipitable water, University of Hawaii at Manoa.

Kim, K. Y., G. R. North, and J. P. Huang, 1996: EOFs of one-dimensional cyclostationary time series: Computations, examples, and stochastic modeling. *J Atmos Sci*, **53,** 1007-1017.

Lu, C. X., and Coauthors, 2015: Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations. *J Geodesy*, **89,** 843-856.

Suseno, D. P. Y., and T. J. Yamada, 2013: The Role of GPS Precipitable Water Vapor and Atmosphere Stability Index in the Statistically Based Rainfall Estimation Using

MTSAT Data. *J Hydrometeorol*, **14,** 1922-1932.

Ye, H. C., and Coauthors, 2014: Impact of increased water vapor on precipitation efficiency over northern Eurasia. *Geophys Res Lett*, **41,** 2941-2947.

Yuan, Y. B., K. F. Zhang, W. Rohm, S. Choy, R. Norman, and C. S. Wang, 2014: Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS precise point positioning. *J Geophys Res-Atmos*, **119,** 10044-10057.

Abstract

On the spatio-temporal relationship between precipitation and the total precipitable water over East Asia

Wangho Keum
School of Earth and Environmental Sciences
The Graduate School
Seoul Nation University

Precipitation (PR) and total precipitable water (TPW) interact through various physical mechanisms. Correlation Between the two variables depends on the space and time scale, and the geographical characteristics of the regions. In this paper, we analyze the degree of correlation between PR and TPW over East Asia by employing CSEOF (Cyclostationary Empirical orthogonal Function) which is a kinds of PCA analysis. CSEOF has an advantage that we are more easily able to decompose annual variation and its climate change than other EOFs. The advantage originated from the synthetic analysis of multi variables in the spatio-temporal domain. The two variances in ERA-Interim monthly Total Column Water vaper and GPCP monthly precipitation amounts with 372 time since January, 1984 to December, 2014 have been decomposed into several CSEOF modes separately. The first mode which explain largest variance and closely related with the climate annual cycle are used for the detailed analysis.

The PCs of both PR and TPW increase at amplitude of variance recently, and they show considerable correlation for the interannual variability. The coefficient of the linear correlation between PR and TPW is 0.61. The result of harmonic analysis of the PCs of both variables shows an enhanced power of the 2 to 6 year oscillations.

As analysis of the decomposed modes of two variables, we can designate a strong relationship between TPW PC series and the horizontal gradient of water vapor field. The horizontal moist gradient affected the horizontal flux convergence of moisture seems to be the most important mechanism handling the rainfall events. Consequently, the variability of PR had a strong connection with the TPW variability

Keywords: Total precipitable water, Precipitation, Cyclostationary EOF
Student number: 2014-20321