

Weather Generator를 이용한 APCC 계절예측의 통계적 상세화 - 동아시아 겨울/여름몬순 기반으로 -

Statistical Downscaling of APCC Seasonal Prediction using Weather Generator
- Based on East Asia Winter/Summer Monsoon -

김무섭 기후연구팀

발간사

APEC 기후센터(APCC)는 아시아-태평양 지역에서 기후정보 중심허브의 역할을 하기 위해 다중모형앙상블기법(multi-model ensemble)을 기반으로 양질의 기후예측정보를 생산하여 배포하고 있다. APCC 계절예측은 성능적 측면에서 국제적 수준에 이르렀으나, 활용적 측면에서 낮은 시간공적 해상도 때문에 그 자체로는 제한이 있다. 특히, 기후관련 응용분야에서는 대상연구지역에 특화된 기후자료를 필요로 하지만 계절예측은 범용적 특성 때문에 그러한 요구를 충족시키기 어렵다. APEC 기후센터는 이러한 계절예측의 한계점을 분명히 인지하고, 계절기후예측 상세화 방법 개발에 박차를 가하고 있다.

농업과 수자원과 같은 기후응용연구는 순수기후연구에 비해 대상지역의 공간규모가 매우 작는데 반해 세밀한 시간규모의 기후자료를 필요로 하는 경우가 많다. 순수기후연구가 대기순환과 같은 대규모 현상을 주로 다루기 때문에, 연구결과도 역시 큰 시공간규모에서 서술된다. 반면에 기후응용연구에서는 대규모 순환 자체보다 그로 인해 파생되는 대상지역의 날씨나 기후에 관심이 있는데, 이는 그 현상이 농작물 성장이나 수자원 관리에 더 직결되기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 대상지역의 계절예측은 순수기후학적 접근이 필요하다. 지역 기후는 전구적인 대기순환의 일부로 나타나는 현상이므로, 그것의 예측도 대규모적 관점에서 비롯되어야 할 것이다. 본 연구에서는 동아시아에 위치한 우리나라의 지리적 특성을 감안하여 동아시아 몬순 강도에 따른 유역의 기후를 모의하는 방식의 통계적 상세화 방법을 강구한다.

상세화 자료에 대한 관심과 요구가 대내외적으로 높아지고 있다. 이러한 상황에 맞추어 APCC의 여러 연구원들이 상세화 연구에 많은 노력을 기울이고 있다. 본 연구에 주도한 김무섭 선임연구원과 연구추진에 많은 도움을 준 정여민 연구원께 깊은 감사를 드린다. 이 밖에도 본 연구에 많은 조언을 준 동료 연구원들께도 감사의 말과 함께, 앞으로도 꾸준한 관심과 응원을 당부한다. 아무쪼록 본 보고서가 계절예측상세화연구 발전에 크게 기여하기를 바란다.

2018년 3월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

The climate application studies such as agriculture and water resource often requires that climate data be available for a very small region, but with a fine time scale. Meanwhile, pure climate researches focus mainly on large-scale atmospheric circulations, so that their results are described in large and coarse scales. Although large-scale circulations have an impact on the local-scale weather and climate, they are not directly utilized for climate application studies due to the scale gap. However, because seasonal predictions for local-scale climates cannot be conducted independently of large-scale circulations, they need to be carried out in the view of pure climate science. Therefore, to produce practical seasonal predictions, we need a method to reduce the scale gap. The related processes are called downscaling.

In this study, we are concerned with the downscaling of the APCC (APEC Climate Center) seasonal prediction for boreal winter and summer season. The target local region is the Nakdong river basin in Korea. It is well known that the EAWM (East Asian Winter Monsoon) and the EASM (East Asian Summer Monsoon) influence the climate of the Korean peninsula during winter and summer, respectively. The downscaling method is based on the response of the climate of the target region to the monsoon circulations. This response is represented by the statistical models embedded into a Weather Generator and multinomial logistic regression models for probabilistic prediction of monsoon strength are established. The downscaling is performed by predicting the monsoon strength by using APCC seasonal prediction as predictor, and producing weather scenarios by running the Weather Generator according to the prediction result.

Many monsoon indices have been proposed for the seasons. We investigate their predictability and relevance to the climate of the target region, and select suitable monsoon indices. Furthermore, based on the selected indices, we produce data for 1000 weather scenarios and verify them by comparing their statistics with those of observational data. Our results confirm that they reproduce various observational statistical characteristics. Therefore, we conclude that the proposed downscaling method is suitable for the purpose of this study.

목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 상세화 방법	3
2.1 연구 자료	3
2.2 상세화 방법	4
2.2.1 동아시아 몬순지수	4
2.2.2 Weather Generator 통계모형	7
2.2.3 몬순확률예측과 상세화 알고리즘	14
3. 연구결과	15
3.1 동아시아몬순의 예측성 평가	15
3.1.1 동아시아겨울몬순지수의 예측성 평가	15
3.1.2 동아시아여름몬순지수의 예측성 평가	16
3.2 상세화 자료 검증 결과	18
3.2.1 LiYang10지수 상세화 자료 검증 결과	18
3.2.2 WebsterYang92지수 상세화 자료 검증 결과	28

4. 결론 및 토론	37
4.1 결론	37
4.2 토론	37
▮ REFERENCES	39
▮ 부록	42
A.1 강수모형	42
A.2 기온모형	45

1. 서론

농업과 수자원과 같은 기후응용연구는 순수기후연구에 비해 대상지역의 공간규모가 매우 작는데 반해 세밀한 시간규모의 기후자료를 필요로 하는 경우가 많다. 순수기후연구가 대기순환과 같은 대규모 현상을 주로 다루기 때문에, 연구결과도 역시 큰 시공간규모에서 서술된다. 반면에 기후응용연구에서는 대규모 순환 자체보다 그로 인해 파생되는 대상지역의 날씨나 기후에 관심이 있는데, 이는 그 현상이 농작물 성장이나 수자원 관리에 더 직결되기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 대상지역의 계절예측은 순수기후학적 접근이 필요하다. 대상지역의 기후는 전구적인 대기순환의 일부로 나타나는 현상이므로, 그것의 예측도 대규모적 관점에서 비롯되어야 할 것이다. 하지만 순수기후학적 예측의 시공간적 규모는 요구되는 것과 큰 차이가 있으므로, 실용적 예측을 생산하기 위해서는 그 차이를 좁히는 과정이 필요하다. 우리는 그러한 과정을 상세화(downscaling)라고 부른다.

본 연구에서는 APCC(APEC Climate Center)에서 매월 생산하는 계절예측의 상세화를 고려한다. MME(multi-model ensemble)기법으로 생산되는 예측자료로서 양질의 예측성능을 보여주고 있으나(Min et al. (2017)), 그 생산과정의 성격상 시공간적 해상도가 낮다. 자체적인 기후정보생산 여건이 미흡한 APEC 소속 국가에 적합한 기후정보를 제공한다는 기관 설립 목적의 관점에서 생산된 계절예측의 상세화는 필수적이다.

본 연구는 구체적으로 우리나라 낙동강 유역을 시범지역으로 하여 겨울과 여름에 대한 APCC 계절예측의 통계적 상세화 방법을 고려한다. 두 계절은 낙동강 유역을 포함한 한반도 기후에 영향을 주는 뚜렷한 대규모 순환이 있는데, 겨울에는 동아시아 겨울몬순, 여름에는 동아시아 여름몬순의 영향이 두드러진다(cf. Kim et al. (2017), Wang et al. (2008)). 통계적 상세화 방법은 이러한 몬순순환에 대한 유역기후의 반응을 기반으로 한다. 우리는 이 반응을 통계모형으로 표현하고 Weather Generator에 내재시켜, APCC 계절예측으로 몬순예측이 나오면 그에 따른 Weather Generator 구동으로 유역기후의 반응을 재현한다. 이처럼 고려되는 상세화 방법에서 몬순예측과 함께 Weather Generator가 중요한 역할을 한다.

본 연구보고서 이후는 다음과 같이 구성된다: 2절에서는 연구자료와 상세화 방법에 대해 설명한다. 고려되는 각 계절의 동아시아 몬순지수, Weather Generator의 통계모형, 확률예측방법을 설명한다. 이어 3절에서는, 방법의 적용결과를 제시한다. 몬순지수의 예측성, Weather Generator로 생성된 상세화 자료의 효용성을 평가한다. 마지막 4절에서 본 연구의 결론을 짓고 향후 연구방향을 모색한다. 부록에서는 본문에서 다루지 못했던 Weather Generator의 세부내용을 설명한다.

2. 연구 자료 및 상세화 방법

2.1 연구 자료

유역기후에 대한 통계모형구축을 위해서 기상관측자료가 필요하다. 본 연구에서는 관측기간이 충분히 긴 ASOS자료를 사용한다. 낙동강 유역 기후를 표현하기 위해 주변에 위치한 14개 지점(그림 1)의 자료를 쓰며 기간은 1988년 1월 1일부터 2013년 12월 31일까지이다.

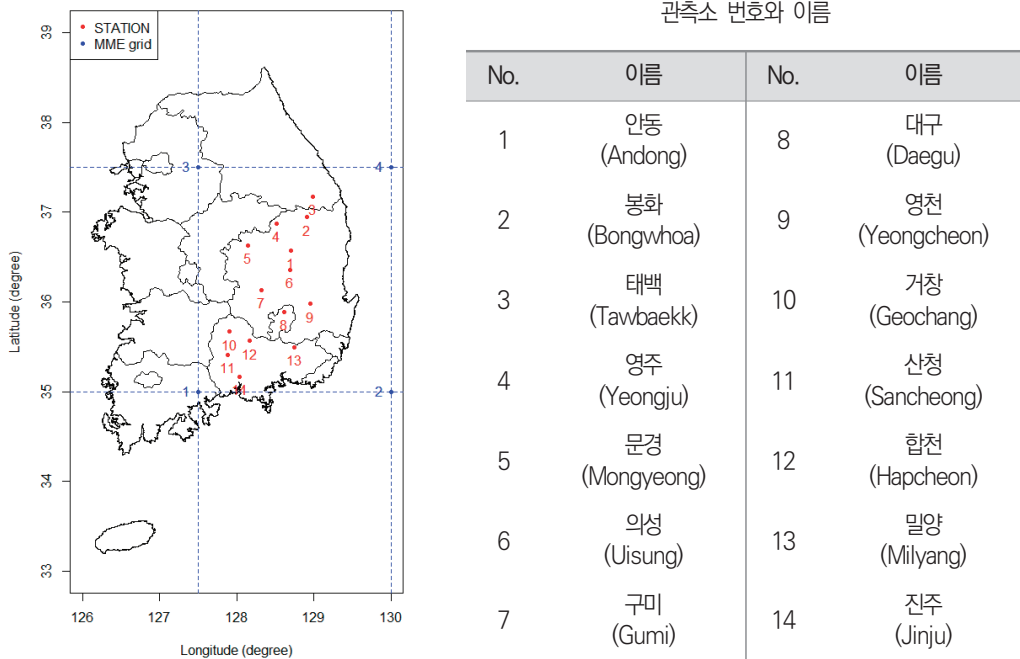


그림 1. 낙동강 유역, ASOS 관측소(적색), APCC MME 격자(청색)

한편, 대규모 순환을 표현하는 기후자료가 필요하다. 본 연구에서는 과거 관측기간의 몬순강도측정을 위해 NCEP2 재분석 자료를 사용한다. 월평균자료로서 기간은 1979년 1월부터 2013년 12월까지이다. 한편, 몬순예측성 평가를 위해서, 본 연구의 목적에 따라 APCC 계절예측자료를 쓴다. 기간은 1983년부터 2011년까지이고, 예측선행시간은 6개월 전까지이다. APCC계절예측 참여모형 중 APCC, JMA, MSC, NASA, NCEP, PNU, POAMA의 자료를 쓰는데, 각 모형은 공통적으로 T2M, T850, PRCP, SST, SLP,

Z500, U200, V200, U850, V850를 위경도 2.5°간격으로 제공한다. 또한, MME기법으로 7개 모형의 SCM을 고려한다.

2.2 상세화 방법

상세화 방법은 동아시아 몬순 강도에 대한 유역기후의 반응을 기반으로 한다. 방법의 단순성을 위해서 몬순강도를 BN(Below Normal), NN(Near Normal), AN(Above Normal), 3 범주로 구분하고 각 범주에 따른 유역기후의 특성을 통계모형으로 표현한다. 상세화는 몬순강도를 확률예측하고, 그 예측결과에 따라 몬순강도를 결정하여 통계모형을 구동해 상세화 자료를 생산하는 순서로 진행된다. 아래에서 본 연구에서 고려하는 각 계절의 몬순지수를 제시하고, Weather Generator 통계모형과 상세화 과정을 설명한다.

2.2.1 동아시아 몬순지수

2.2.1.1 동아시아 겨울몬순지수

표 1은 본 연구에서 고려하는 동아시아 겨울몬순지수를 제시한다. LiYang10이 U200의 겨울철 3개월 평균을 기반하는 반면에, 나머지 지수는 모두 SLP로부터 계산된다. 지수의 계산식은 표의 참고문헌에서 주어진다. 단, 본 연구의 지수계산에서는 기후변수를 표준화하지 않았다. 표 2에서처럼 지수들은 유역기후와 관련이 있는데, XuJi65 지수를 제외한 모든 지수가 유역의 겨울철 평균기온과 매우 유의한 상관관계를 보인다. 한편, 겨울철 누적 강수량과도 대체로 유의한 상관관계를 보이기는 하지만 그 정도가 기온보다는 낮다.

몬순지수는 몬순강도를 나타낸다. 우리는 상세화 방법의 단순성을 위해서 표 3에서 주어진 몬순지수의 삼분위수를 기준으로 몬순강도를 BN, NN, AN, 3 범주로 나눈다. 참고문헌에 주어진 지수의 정의상, Kim17지수에 대해서는 BN이 강한 몬순, AN이 약한 몬순에 해당되는 반면에 나머지는 그 반대로 해당된다. 몬순지수예측은 지수값 대신 범주를 대상으로 시행된다.

표 1. 고려하는 동아시아 겨울몬순지수. LiYang10 지수는 U200 기반, 나머지 지수는 모두 SLP 기반 지수이다.

몬순지수	참고문헌	몬순지수	참고문헌
ChanLi04	Chan and Li (2004)	Shi96	Shi (1996)
Gong01	Gong et al. (2001)	WangChen14	Wang and Chen (2014)
Guo94	Guo (1994)	Wang09	Wang et al. (2009)
Kim17	Kim et al. (2017)	WuWang02	Wu and Wang (2002)
LiYang10	Li and Yang (2010)	XuJi65	Xu and Ji (1965)

표 2. 동아시아 겨울 몬순지수와 유역 겨울철 평균기온과 누적강수량과 상관관계

** : 유의수준 1%에 유의, * : 유의수준 5%에서 유의.

몬순지수	기온	강수	몬순지수	기온	강수
ChanLi04	-0.57(**)	-0.46(*)	Shi96	-0.57(**)	-0.54(**)
Gong01	-0.61(**)	-0.41(*)	WangChen14	-0.73(**)	-0.51(**)
Guo94	-0.57(**)	-0.43(*)	Wang09	-0.57(**)	-0.24
Kim17	+0.69(**)	+0.34	WuWang02	-0.61(**)	-0.40(*)
LiYang10	-0.69(**)	-0.49(*)	XuJi65	-0.31	-0.64(**)

표 3. 동아시아 겨울 몬순지수의 33%와 66%분위수. 33%분위수 이하의 범위를 BN범주, 66%분위수 이상의 범위를 AN범주, 그 사이 범위를 NN범주로 정의한다.

몬순지수	33%분위수	66%분위수	몬순지수	33%분위수	66%분위수
ChanLi04	20.1	21.8	Shi96	15.4	16.8
Gong01	1027.6	1029.2	WangChen14	17.1	19.2
Guo94	14.1	15.3	Wang09	18.7	20.7
Kim17	-12.2	-8.7	WuWang02	14.3	15.5
LiYang10	58.2	61.9	XuJi65	6.3	7.1

2.2.1.2 동아시아 여름몬순지수

표 4은 APCC 계절예측에서 제공하는 기후변수를 기반으로 한 동아시아 여름몬순지수를 제시한다. 지수계산식은 각 참고문헌에서 주어지는데, 본 연구의 지수계산에서도 기후변수를 표준화하지 않았다. 표 5에서부터 알 수 있듯이, 모든 지수가 여름철 누적강

수량과 무관하지만, LauYang00과 WebsterYang92지수가 여름철 평균기온과 매우 유의한 상관관계를 보인다. 동아시아 여름몬순지수에 대해서도 앞서 겨울몬순의 경우에서 처럼 표 6에서 주어진 분위수를 기준으로 범주화를 적용한다.

표 4. 고려하는 동아시아 여름몬순지수. 이들 지수는 APCC 계절예측에서 제공하는 기후변수를 기반으로 한다.

몬순지수	참고문헌	몬순지수	참고문헌
He01	He et al. (2001)	WangFan99	Wang and Fan (1999)
LauYang00	Lau and Yang (2000)	WebsterYang92	Webster and Yang (1992)
ShiZhu96	Shi and Zhu (1996)	WuNi97	Wu and Ni (1997)
Wang01	Wang et al. (2001)	Zhang03	Zhang et al. (2003)
Wang98	Wang et al. (1998)	ZhaoZhou05	Zhao and Zhou (2005)

표 5. 동아시아 여름 몬순지수와 유역 여름철 평균기온과 누적강수량과 상관관계.

** : 유의수준 1%에 유의, * : 유의수준 5%에서 유의

몬순지수	기온	강수	몬순지수	기온	강수
He01	+0.20	+0.12	WangFan99	+0.35	+0.08
LauYang00	+0.62(**)	-0.20	WebsterYang92	-0.57(**)	+0.03
ShiZhu96	-0.09	-0.20	WuW97	+0.05	-0.13
Wang01	+0.15	+0.08	Zhang03	+0.25	+0.13
Wang98	+0.09	+0.14	ZhaoZhou05	-0.12	+0.06

표 6. 동아시아 여름 몬순지수의 33%와 66%분위수. 33%분위수 이하의 범위를 BN범주, 66%분위수 이상의 범위를 AN범주, 그 사이 범위를 NN범주로 정의한다.

몬순지수	33%분위수	66%분위수	몬순지수	33%분위수	66%분위수
He01	16.7	18.9	WangFan99	3.0	5.5
LauYang00	9.5	13.2	WebsterYang92	2.1	3.0
ShiZhu96	-8.4	-7.7	WuW97	2.9	3.4
Wang01	2.2	2.5	Zhang03	-1.0	1.0
Wang98	17.7	20.2	ZhaoZhou05	-7.8	-7.0

2.2.2 Weather Generator 통계모형

유역기후를 설명하는 통계모형은 크게 강수모형과 기온모형으로 구성된다. 아래에서 각각에 대해 설명한다.

2.2.2.1 강수모형

강수모형은 건조기(dry-spell)와 습윤기(wet-spell) 생성모형으로 구분된다. 건조기는 비 또는 눈이 오지 않는 기간으로, 그 지속기간에 대한 통계모형이 필요하다. 우리는 이 지속기간에 대한 모형으로 음이항분포를 고려한다. 흔히 습윤/건조일 생성을 위해 first-order Markov 모형이 쓰이는데(cf. Semenov et al. (1998), Apipattanavis et al., 2007), 이 경우에 건조기 지속일수는 기하분포를 따른다. 음이항분포는 기하분포를 포함하는 모형으로, 이로써 first-order Markov 모형 분석에서 발생할 수 있는 적합결여를 대비한다. 습윤기 생성모형은 여러 세부 요소가 있으나, 강수량 분포모형이 가장 중요하다. 지점 강수량에 대해 지수분포, 혼합분포(mixture distribution) 등 다양한 분포모형이 쓰이고 있으나, 본 연구에서는 감마분포를 고려한다. 이 밖에, 습윤일 지점무강수확률, 공간상관을 표현하는 Gaussian-copula 공분산 행렬이 강수량모형의 요소이다. 습윤기 생성모형과 관련된 알고리즘의 보다 자세한 내용은 부록에서 다룬다.

앞서 몬순강도를 BN, NN, AN, 3 범주로 나누었다. 상세화를 위해 건조기/습윤기 생성모형을 몬순범주에 따라 구분하여 추정한다. 그림 2-3은 각각 동아시아 겨울몬순지수 LiYang10과 여름몬순지수 WebsterYang92의 범주에 따른 적합으로부터 얻어진 건조기 지속일수평균과 강수강도의 추정결과를 나타내고 있다. 여기서, 강수강도는 유역 14개 지점의 평균이다. 겨울의 경우 몬순이 BN일 때, 전반적으로 건조기가 짧아지고 강수강도가 강해지는 반면에, AN일 경우에 1월 건조기가 뚜렷이 길어진다. 한편, 여름의 경우에는 몬순이 AN일 때, 6월 건조지속기간이 약간 줄어들고, 몬순이 BN일 때, 7월 강수강도가 강해진다. 단, 추정결과는 몬순지수에 따라 달라질 수 있다.

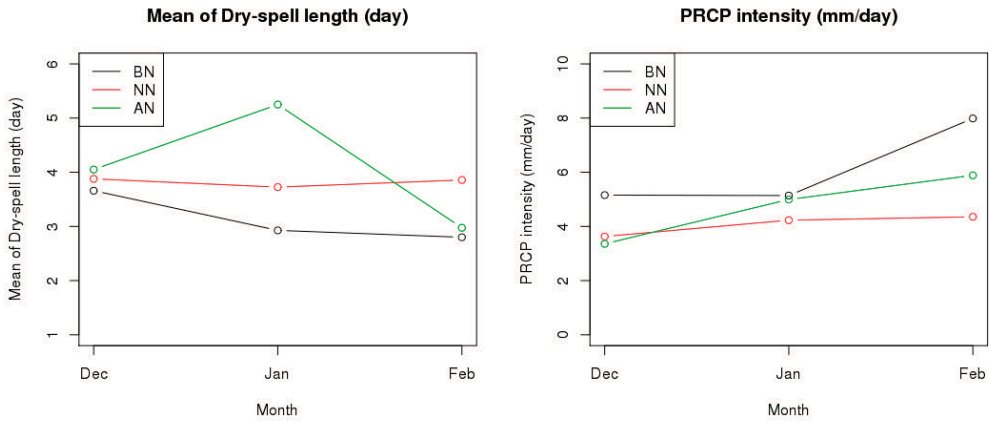


그림 2. 동아시아 겨울 문순 LiYang10지수에 따른 강수모형 주요 모수 변동. 강수강도는 14개 지점의 평균이다. 문순의 강도가 BN일 때, 건조기가 짧아지고, 강수강도가 강해진다.

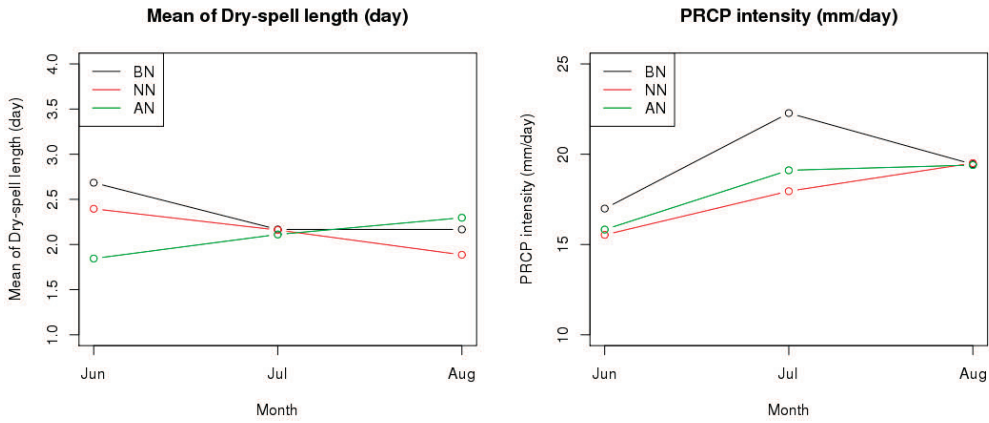


그림 3. 동아시아 여름 문순지수 WebsterYang92에 따른 강수모형 주요 모수 변동. 강수강도는 14개 지점의 평균이다. 문순강도가 AN일 때, 6월 건조기 지속기간이 약간 줄어들고, 문순강도 BN일 때 7월 강수강도가 강해진다.

주어진 문순범주에 따른 강수시나리오 생성알고리즘은 아래와 같다. $R^*(t) = (R^*(s_1, t), \dots, R^*(s_d, t))$ 은 알고리즘에 의해 생성될 시점 t 에서 지점 s_1, \dots, s_d 의 강수량을 나타낸다.

강수시나리오 생성알고리즘

몬순범주와 모의기간 $t_0 + 1, \dots, t_0 + n$ 이 주어졌다고 하자. 강수모형의 모든 모수를 주어진 몬순범주에 따라 정한다. 변수 t° 의 값을 t_0 으로 두고, '상태'를 '건조'와 '습윤' 중 하나를 무작위로 정한다. 다음 단계로 반복하여, $\mathbf{R}^*(t_0 + 1), \dots, \mathbf{R}^*(t_0 + n)$ 을 생성한다:

$t^\circ \geq t_0 + n$ 이라면, 알고리즘을 멈춘다.

상태가 '건조'라면,

음이항분포로부터 건조지속일을 생성한다.

생성된 건조지속일이 m 이면, $t = t^\circ + 1, \dots, t^\circ + m$ 에 대해, $\mathbf{R}^*(t) = (0, \dots, 0)$ 으로 둔다.

t° 의 값을 $t^\circ + m$ 으로 바꾸고, 상태를 '습윤'으로 전환하여 단계 1로 간다.

상태가 '습윤'라면,

부록의 습윤기생성알고리즘으로 $\mathbf{R}^*(t^\circ + 1), \dots, \mathbf{R}^*(t^\circ + m)$ 의 값을 정한다.(여기서, m 은 생성된 습윤기의 길이.)

t° 의 값을 $t^\circ + m$ 으로 바꾸고, 상태를 '건조'로 전환하여 단계 1로 간다.

2.2.2.2 기온모형

시점 t 에서 지점 s 의 일최고/최저기온 $T(s, t)$ 에 대해 아래와 같은 분해식을 고려한다:

$$T(s, t) = E\{T(s, t)\} + \Lambda(s, t) + \Delta(s, t) + \sigma(s, t)\epsilon(s, t). \quad (1)$$

여기서, $E\{T(s, t)\}$ 는 평년기온, $\Lambda(s, t)$ 은 저주파 진동, $\Delta(s, t)$ 는 강수에 따른 기온상승 또는 하강효과, $\sigma(s, t)$ 는 표준편차, $\epsilon(s, t)$ 는 anomaly를 뜻한다. 요소의 세부적인 모형과 추정방법은 부록에서 설명한다. 그림 4은 기온변동분해의 예로서 해당기간에서 추정된 요소의 변동을 보여준다. 그림에서처럼 기온모형 (1)은 기온변동설명에서 anomaly에 의한 고주파변동과 더불어 저주파진동을 도입한다. 그림 5은 해당기간의 저주파/고주파진동을 나타낸다. 두 그림에 나타난 저주파진동에 의하면 2009년 2월 상순(Julian day가 30부터 40사이)에 완만한 기온상승이 뚜렷하다. 이러한 변동특징은 저주파수대 진동으로 설명하는 것이 효과적이기 때문에 그러한 진동항 도입이 적절하다고 볼 수 있다.

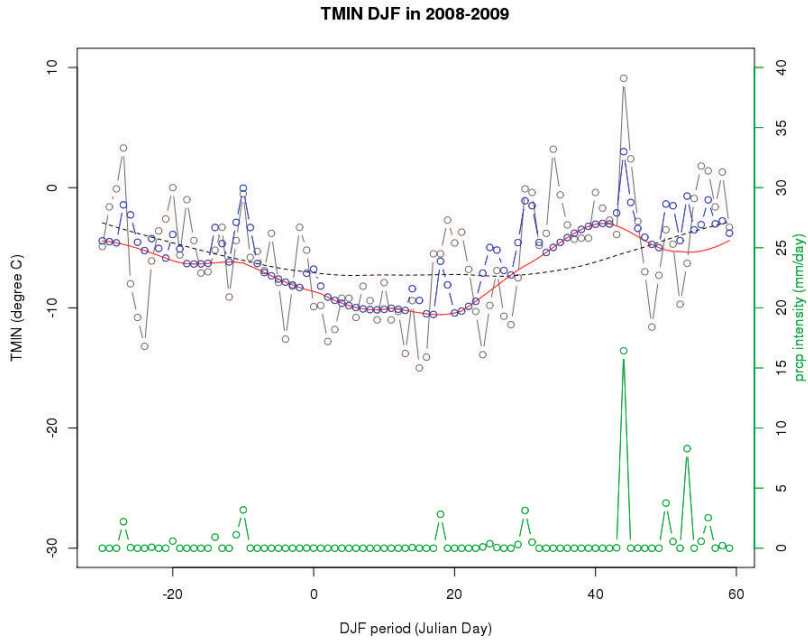


그림 4. 2008-2009년 겨울기간(12월-2월) 동안 안동지점의 관측 일최저기온(회색연결선), 평년기온(흑색파선), 저주파진동(적색실선), 강수효과(청색연결선)와 일강수량(녹색). 저주파진동이 나타내듯이 2월상순에 완만한 기온상승이 있었다.

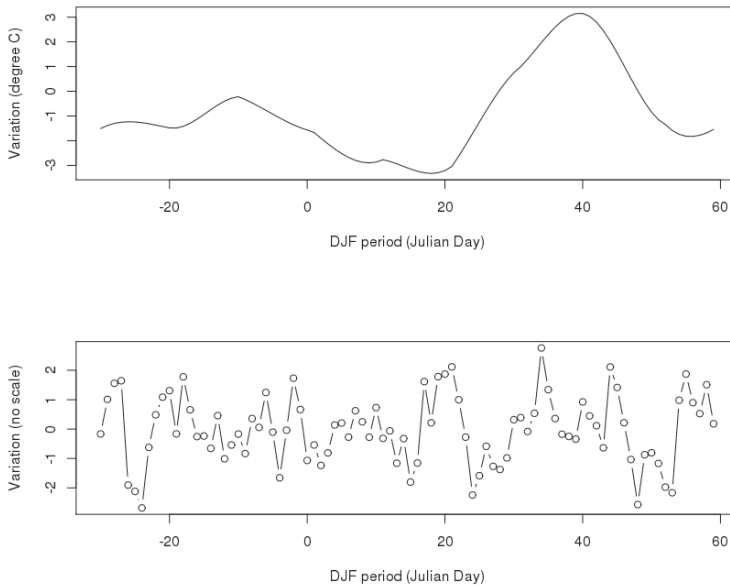


그림 5. 2008-2009년 겨울기간(12월-2월) 동안 안동지점 일최저기온의 저주파진동(상단)과 고주파진동, 즉, anomaly(하단).

저주파진동은 그림 6에서 보이듯이 강한 양의 공간상관성을 지니고 있다. 즉, 추정된 저주파진동이 지점의 특이변동이 아닐 뿐만 아니라 그것의 공간평균은 유역의 계절기온 변동을 잘 대변함을 의미한다. 더 나아가, 저주파 진동이 대규모순환과 밀접한 관련이 있는 것으로 확인된다. 그림 7은 동아시아 겨울몬순지수 LiYang10에 따른 저주파진동의 반응을 보이고 있다. 그림에서 회색은 각 해의 저주파진동의 공간평균, 흑색실선은 각 범주에서 공간평균의 평균을 나타내는데, 몬순강도가 AN일 때, 뚜렷한 수준하강이 보인다.

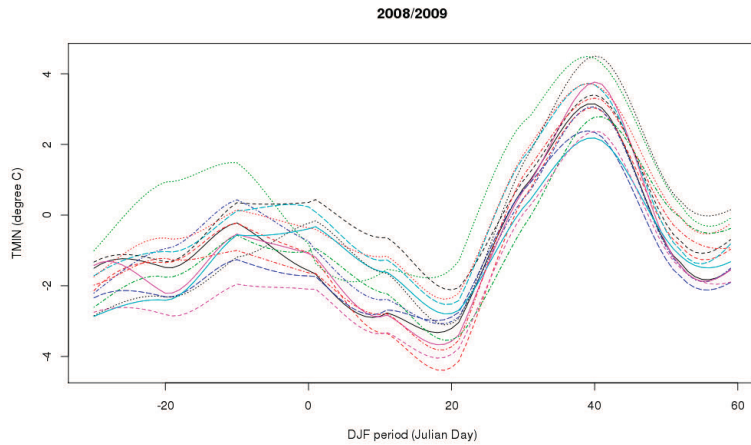


그림 6. 2008-2009년 겨울기간(12월-2월) 동안 낙동강 유역 14개 지점의 저주파진동. 진동의 형태가 매우 유사하다.

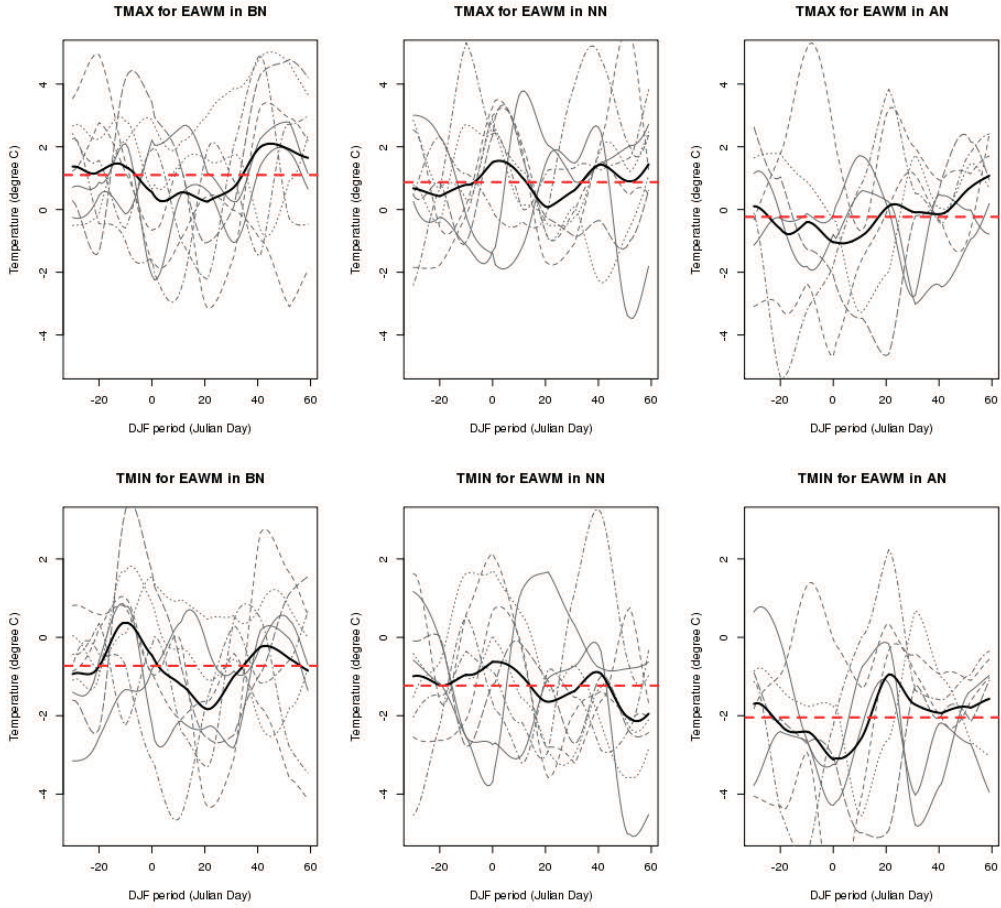


그림 7. 동아시아겨울문순 LiYang10지수에 따른 일최고/최저기온의 저주파진동 반응. 각 해의 공간평균(회색), 각 동일 강도범주의 평균(흑색실선)과 수준(적색파선). 문순강도가 AN범주에 있을 때, 뚜렷한 수준하강이 나타난다.

계절예측 상세화의 단순성을 위해서 저주파 진동만이 문순과 관련이 있다고 전제한다. 이는 저주파대 진동에서 문순영향이 두드러지고, 다른 요소들에 대해서도 문순과 관련성을 고려할 때 따르는 복잡성을 피하기 위함이다. 그러면, 상세화 방법의 완성을 위해 문순강도에 따른 저주파변동 생성법이 필요하다. 본 연구에서 다음과 같은 생성법을 고려한다. 아래에서

$$A_i(t) = (A_i^{\text{tmax}}(s_1, t), \dots, A_i^{\text{tmax}}(s_d, t), A_i^{\text{tmin}}(s_1, t), \dots, A_i^{\text{tmin}}(s_d, t)) \quad (2)$$

은 관측년도 i 의 모든 지점 일최고(tmax)/최저기온(tmin) 저주파진동의 벡터이고, s_1, \dots, s_d 는 대상지점을 나타낸다.

저주파변동 생성법

- 문순범주가 주어졌고, I 가 해당범주의 관측년도의 집합이라 하자. 또한, $n = |I|$ 은 해당범주의 관측년수라고 하자.
- 저주파진동의 평균과 편차를 계산한다:

$$\bar{A}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i \in I} A_i(t), \quad Y_i(t) = A_i(t) - \bar{A}(t), \quad i \in I.$$

- 새로운 저주파진동 생성을 위해서, 정규분포 $N(0, 1/n)$ 로부터 난수 η_1, \dots, η_n 를 생성하여

$$A^*(t) = \sum_{i \in I} \eta_i Y_i(t) + \bar{A}(t)$$

를 얻는다.

이 생성법은 저주파진동을 정규성을 지닌 Hilbert 공간 함수형 확률변수로 간주하여 고안한 방법이다.(Hilbert 공간 함수형 확률변수의 정의와 정규성은 Bosq (2000)를 참고하기를 바란다.) 이 생성법을 통해 과거저주파진동의 통계적 성질을 보존하면서 다양한 형태의 진동을 얻을 수 있다. 다음은 주어진 문순범주에 따른 기온시나리오 생성 알고리즘이다.

기온시나리오 생성 알고리즘

문순범주와 모의기간이 주어졌다고 하자. 주어진 문순범주에서 강수시나리오 생성 알고리즘에 따라 강수시나리오를 생성하였다고 전제하고 다음을 시행한다:

1. 주어진 문순범주에서 저주파진동 생성법에 따라 저주파진동을 생성한다.
2. 강수시나리오로부터 강수효과와 표준편차를 각각 부록의 모형식 (3)와 (5)에 따라 얻는다.
3. Anomaly를 부록의 Anomaly 생성 모형으로 생성한다.
4. 식 (1)을 통해 일최고/최저기온 값을 얻는다.

2.2.3 문순확률예측과 상세화 알고리즘

문순범주확률예측을 위해 다항로지스틱회귀모형(multinomial logistic regression model)을 고려한다:

$$\log \frac{p_{BN}}{p_{AN}} = \beta_{0,1} + \beta_{1,1}X, \quad \log \frac{p_{NN}}{p_{AN}} = \beta_{0,2} + \beta_{1,2}X, \quad p_{BN} + p_{NN} + p_{AN} = 1 \quad (3)$$

으로부터 문순강도가 각 범주에 속할 확률값을 얻는다. 여기서, p_{BN}, p_{NN}, p_{AN} 은 각 범주에 속할 확률, X 는 문순지수에 대한 참여개별모형 또는 MME의 계절예측값이고, 식의 회귀계수는 계절예측자료를 사용해 최대우도법(maximum likelihood method)으로 추정한다. 다음은 주어진 확률예측에 따른 상세화 알고리즘이다.

상세화 알고리즘

문순범주확률예측(p_{BN}, p_{NN}, p_{AN})과 모의기간이 주어졌다고 하자.

1. 주어진 문순범주예측확률에 따라 문순범주 중 하나를 선정한다.
2. 선정된 문순범주에 따라 강수시나리오 생성알고리즘을 시행해 강수시나리오를 얻는다.
3. 선정된 문순범주와 앞서 생성된 강수시나리오에 따라 기온시나리오 생성알고리즘을 시행해 기온시나리오를 얻는다. 강수시나리오와 기온시나리오가 합쳐져 최종 상세화 자료가 완성된다.

3. 연구결과

3.1 동아시아몬순의 예측성 평가

3.1.1 동아시아겨울몬순지수의 예측성 평가

표 1에서 주어진 몬순지수의 예측성을 고려한다. 계절예측과 재분석자료의 몬순지수 간 상관분석을 한 결과, LiYang10지수를 제외한 나머지는 예측성을 보이지 않았다. 그래서, 우리는 LiYang10지수의 예측성을 중점적으로 시험한다. 그림 8은 각 모형의 상관계수를 선행시간별로 나타내는데, POAMA와 SCM기법의 MME가 비교적 정확하게 몬순강도를 예측하고 있다.

확률예측을 위해서 식 (3)에서 주어진 다항로지스틱회귀모형을 고려한다. 예측성 평가를 위해서 leave-one-year-out 교차검증을 통해 RPSS(ranked probability skill score)를 계산하였다(cf. Weigel et al., 2007). 그림 9는 그 계산결과를 나타내는데, POAMA와 MME가 모든 선행시간에서 예측성을 보인다. 그래서, 우리는 LiYang10지수가 대상구역의 겨울기후를 잘 설명하면서 예측성도 갖춘 동아시아 겨울몬순지수라고 결론 내린다.

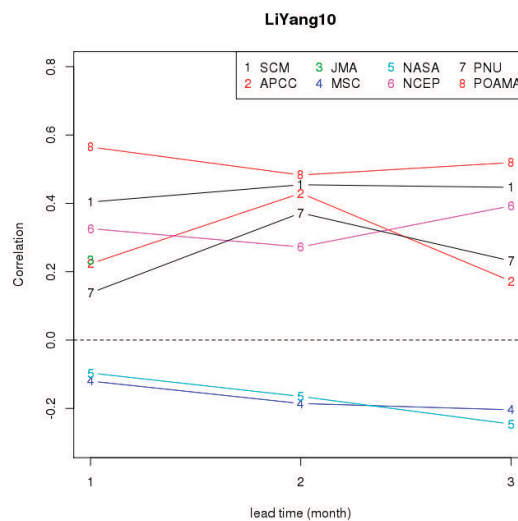


그림 8. LiYang10지수(DJF)의 상관계수. 모형지수와 관측지수 간 상관계수 계산. Lead time = 1 : November, 2 : October, 3 : September의 예측을 의미. POAMA와 MME(SCM)에 의해 모든 선행시간에서 몬순강도가 비교적 정확하게 예측되고 있다.

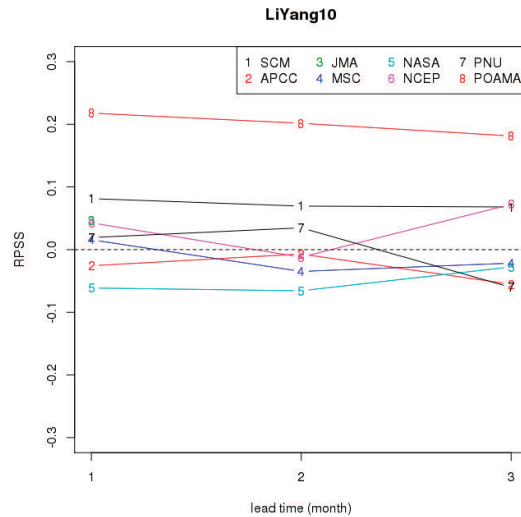


그림 9. LiYang10지수(DJF)에 대한 다항로지스틱회귀모형의 RPSS. Lead time = 1 : November, 2 : October, 3 : September의 예측을 의미. POAMA와 MME(SCM)가 모든 선행시간에서 예측성을 보이고 있다.

3.1.2 동아시아여름문순지수의 예측성 평가

표 5부터 알 수 있듯이, 표 4에서 주어진 문순지수 10개 중 LauYang00과 WebsterYang92만이 유역기온과 관련성을 보이고 있기 때문에, 이 두 지수의 예측성 평가에 집중한다. 평가방식은 앞선 절에서와 동일하다. 그림 10은 예측의 상관계수를 나타내는데, LauYang00지수는 예측성이 낮은 반면에 WebsterYang92지수는 꽤 정확히 예측되고 있다. 또한, 그림 11에 의하면, 다항로지스틱회귀모형에 의한 확률예측에서도 MME, MSC, PNU, POAMA에 의한 예측이 유의미한 것으로 나타난다. 그래서, 우리는 WebsterYang92지수가 대상유역의 여름기후와 관련성이 있으면서 예측성을 지닌 동아시아 여름문순지수라고 결론짓는다.

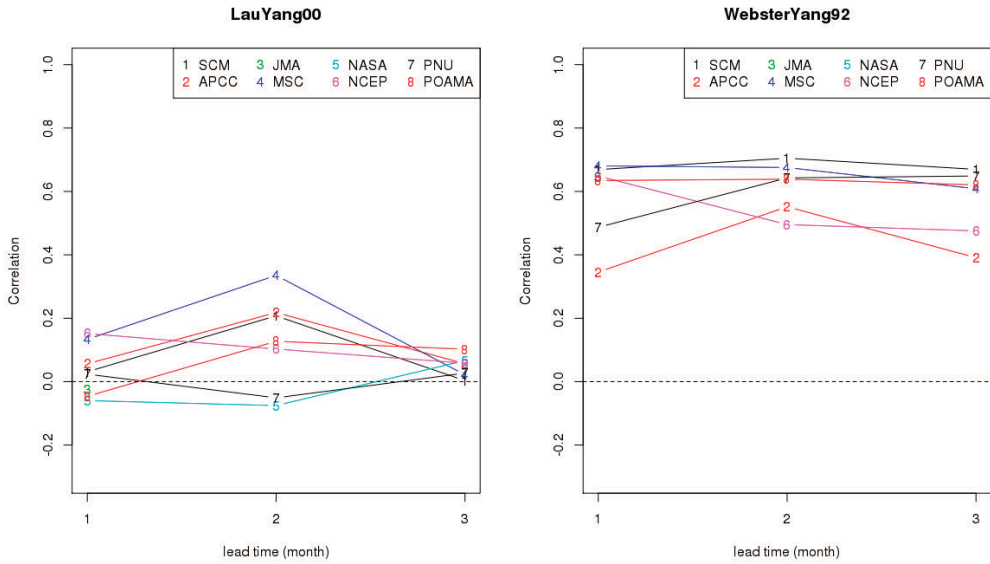


그림 10. LauYang00과 WebsterYang92지수(JJA)의 상관계수. Lead time = 1 : May, 2 : April, 3 : March에 해당. WebsterYang92지수가 모형에 의해 잘 예측된다.

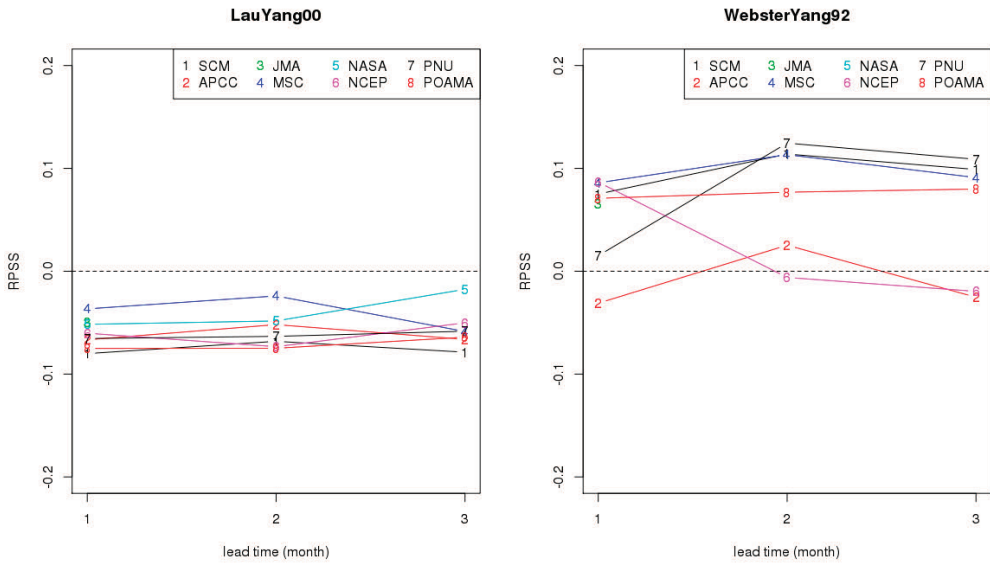


그림 11. LauYang00과 WebsterYang92지수(JJA)에 대한 다항로지스틱회귀모형의 RPSS. Lead time = 1 : May, 2 : April, 3 : March에 해당. WebsterYang92지수의 예측성이 재확인되고 있다.

3.2 상세화 자료 검증 결과

앞서, LiYang10지수와 WebsterYang92지수가 대상구역의 해당계절기후와 관련성이 있으면서 예측성도 보임을 확인하였다. 이제, 이 두 지수에 대해 앞서 제안한 상세화 방법으로 각 문순범주별로 1000개씩 자료를 생산하여 효용성을 검증하고자 한다. 효용성 검증은 생산된 상세화 자료가 문순범주 기간 관측자료의 다양한 통계적 특성을 재현하는지 여부와 그 정도의 평가로 실시된다. 평가되는 통계적 특성은 강수 및 기온의 일별 분포, 무강수확률, 공간상관, 시간적 상관, 변수 간 상관, 기온의 계절평균, 강수의 계절 누적량이다. 아래에서 각 지수별로 검증결과를 살펴본다.

3.2.1 LiYang10지수 상세화 자료 검증 결과

3.2.1.1 일별분포

강수량과 기온에 대해 월별로 관측과 상세화 자료 간 일별분포의 유사성을 분위수 비교를 통해 확인한다. 그림 12에서 LiYang10지수가 BN 범주에 있을 때, 12월의 강수량 일별분포를 각 지점별로 분위수그림(Q-Q plot)을 통해 비교한다. 전반적으로 관측의 일별분포가 잘 재현되고 있음을 확인할 수 있다. 정량적인 검증을 위해서, 강수량에 대해 카이제곱적합도검정¹⁾과 기온에 대해 K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정을 적용하였다. 모든 문순범주와 달에 대해, 표 7에서 나타나듯이, 다수의 지점에서 일별분포의 차이가 유의하지 않으며, 차이가 있는 경우에서도 분위수그림으로 볼 때 차이 정도가 심하지 않은 것으로 나타났다. 예를 들어, 그림 12의 경우에, 봉화지점에서 카이제곱검정결과 유의확률 2%로 일별분포 간 차이가 유의한 것으로 나오지만, 분위수그림으로 볼 때 그 차이가 크지 않은 것으로 판단된다. 그래서, 우리는 일별분포가 잘 재현되는 것으로 결론 내린다.

1) 강수량의 경우, 같은 값이 여러 번 등장하는 자료의 특징을 감안하여 K-S 검정 대신 카이제곱적합도검정을 고려하였다.

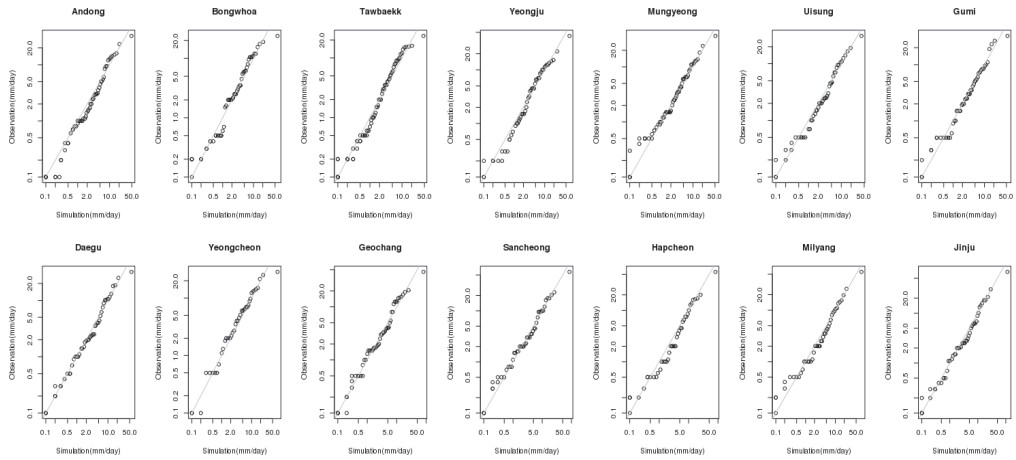


그림 12. 몬순범주가 BN일 때, 12월 강수량 일별분포의 비교. 전반적으로 관측의 일별분포가 잘 재현되고 있다. 카이제곱검정결과, 봉화지점에서 유의한 차이가 감지되지만, 그림으로 볼 때, 그 차이가 심하지 않는 것으로 판단된다.

표 7. 유의수준 5%에서 유의한 일별분포차이를 보인 지점 수(총지점수:14개)

범주	월	강수	일최고기온	일최저기온
BN	12	1	0	0
	1	1	0	0
	2	4	0	0
NN	12	2	0	0
	1	0	0	0
	2	2	0	0
AN	12	1	1	0
	1	4	0	0
	2	0	1	0

3.2.1.2 무강수확률

몬순범주에 따른 무강수확률의 재현 여부를 확인한다. 그림 13은 각 몬순범주와 달에 대해 각 지점의 무강수확률(%)의 평균을 비교한 결과로, 그림에서 회색으로 표시된 구간은 신뢰수준 95%의 신뢰구간을 의미한다. 몬순범주 AN의 12월을 제외한 모든 경우에서 그 차이가 유의하지 않기 때문에, 무강수확률이 잘 재현되는 것으로 결론 내린다.

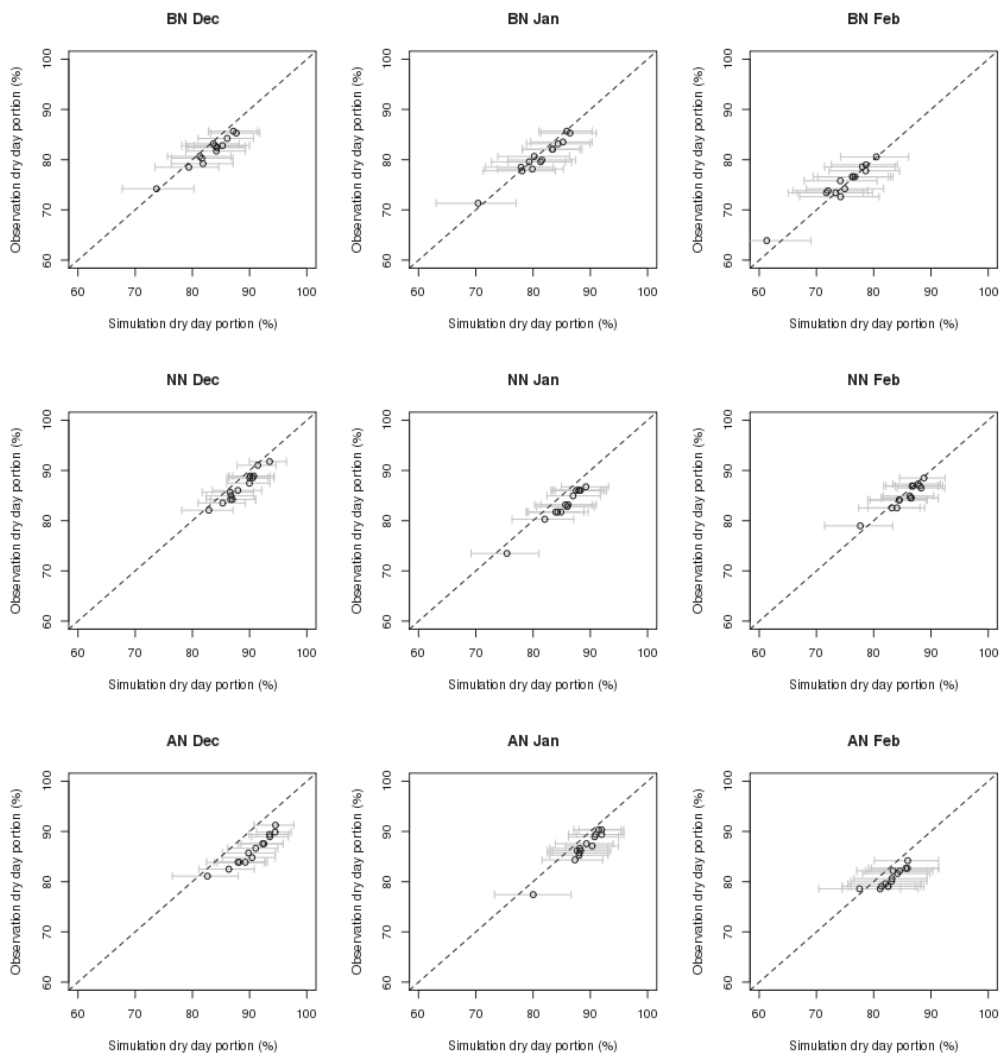


그림 13. 각 몬순범주와 달에 대한 각 지점의 무강수확률(%)의 비교. 회색구간은 상세화 자료로부터 얻어진 95% 신뢰구간을 뜻한다. 전반적으로 무강수확률이 잘 재현되고 있다.

3.2.1.3 공간상관

강수량과 기온의 지점 간 상관의 재현 여부를 검증한다. 관측과 상세화 자료에 대해 총 $91 = \binom{14}{2}$ 개 지점 쌍의 상관계수를 계산하여 비교한다. 기온에 대해서 Pearson 상관계수를 계산하지만, 강수에 대해서는 비정규성을 감안하여 Spearman 상관계수를 고려한다. 그림 14-16에서 강수, 일최고/최저기온의 공간상관의 유사성을 확인할 수 있다. 그림에서 차이의 유의성을 확인하기 위해서 앞선 경우에서처럼 95% 수준 신뢰구간을 회색으로 표시하였다. 그림으로부터 모든 변수의 공간상관이 잘 재현되는 것으로 판단된다.

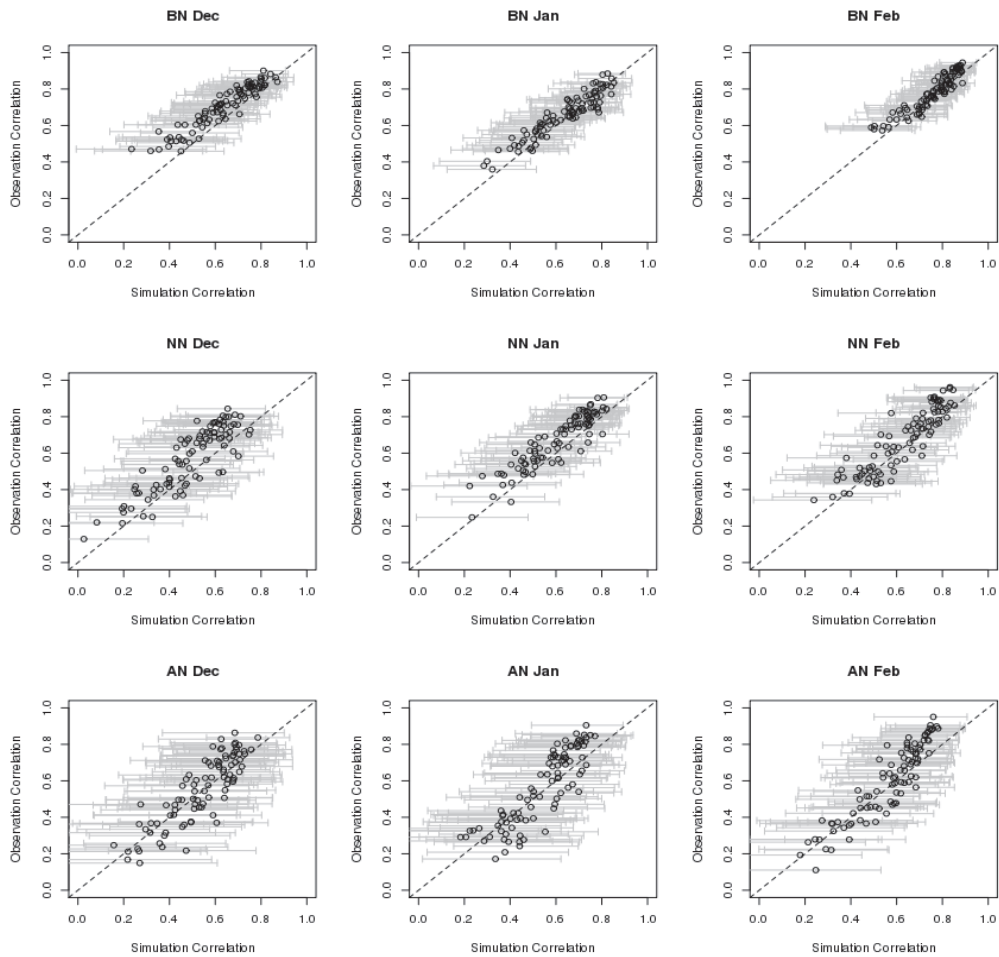


그림 14. 각 몬순범주와 달에 대해서 강수의 공간상관비교. 전반적으로 관측의 공간상관이 잘 재현되는 것으로 보인다.

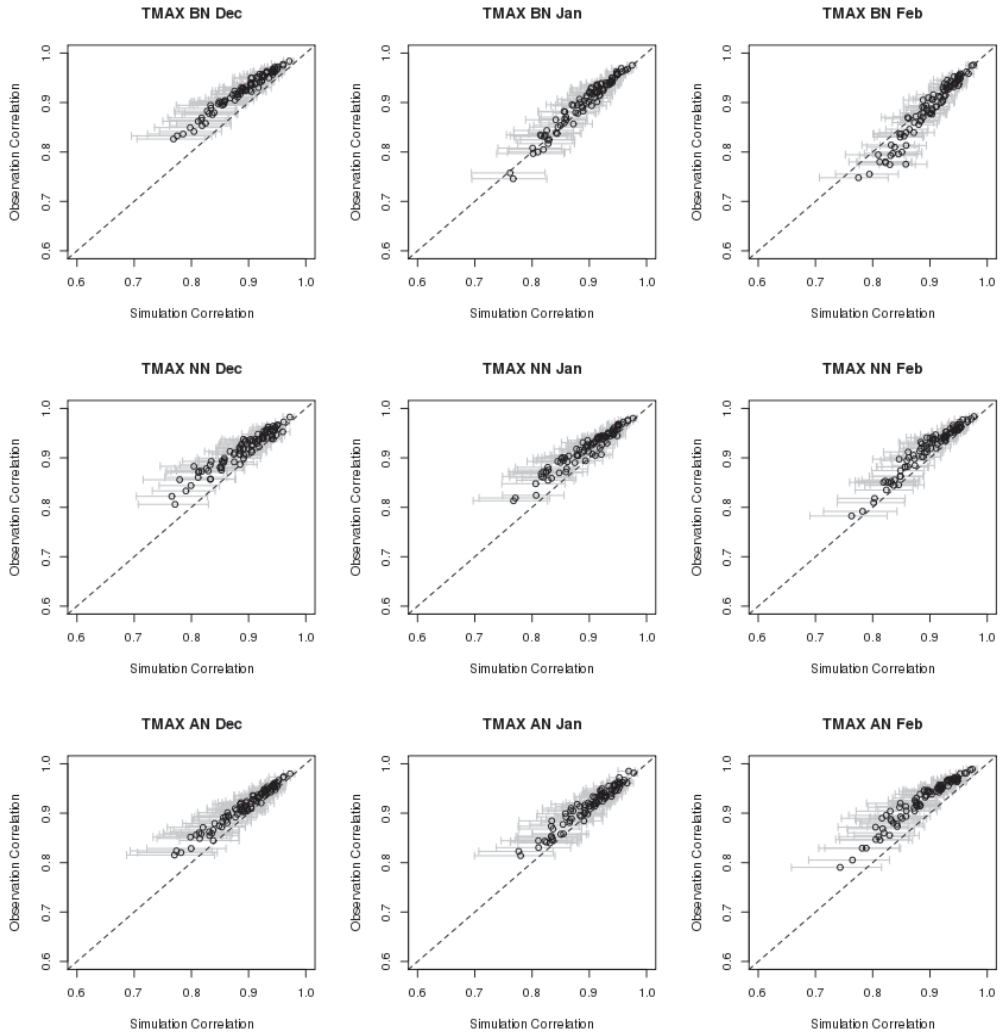


그림 15. 각 몬순범주와 달에 대해서 일최고기온의 공간상관비교. 전반적으로 관측의 공간상관이 잘 재현되는 것으로 보인다.

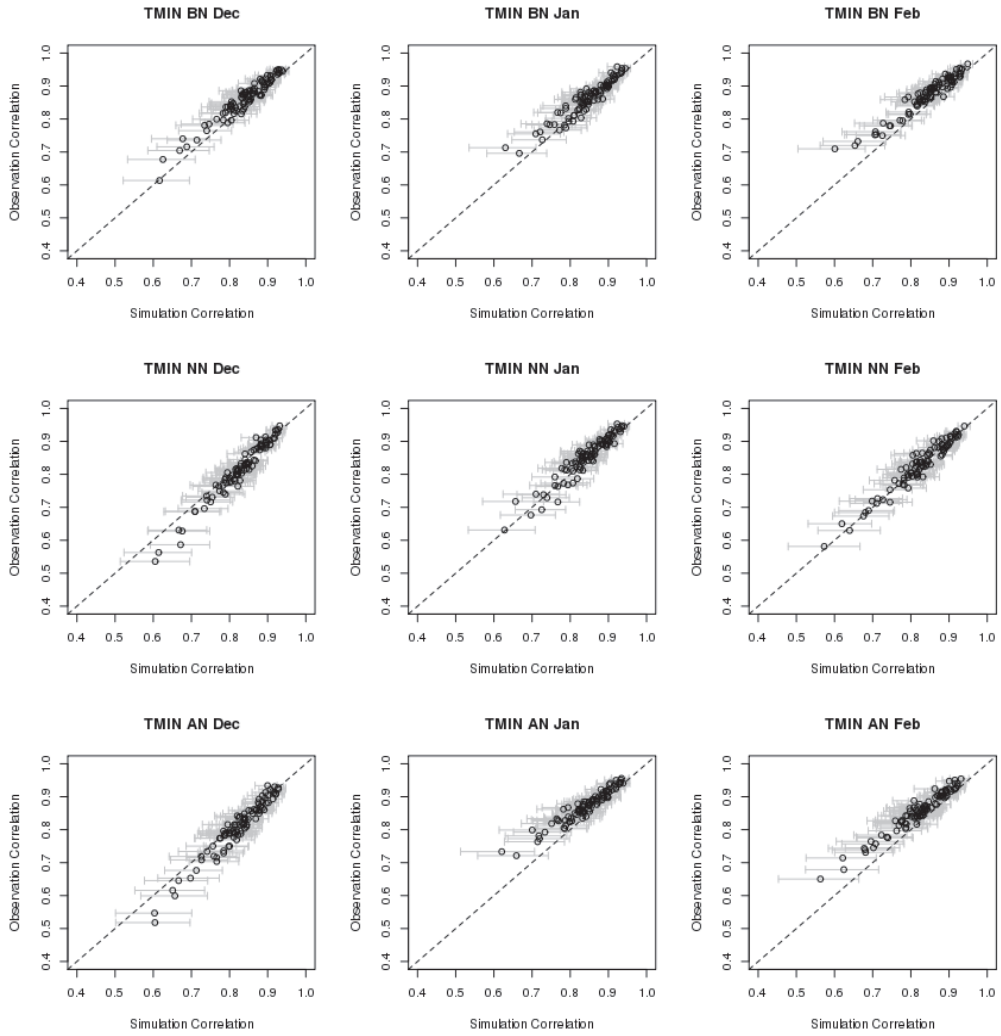


그림 16. 각 몬순범주와 달에 대해서 일최저기온의 공간상관비교. 전반적으로 관측의 공간상관이 잘 재현되는 것으로 보인다.

3.2.1.4 시간적 자기상관 및 교차상관

기온은 공간상관과 더불어 일최고/최저기온 간 상관, 시간적 자기상관이 두드러지고, 또한 강수의 영향을 받는다. 그래서, 기온의 상관구조 특성이 상세화 자료에서 잘 재현되는지 여부를 확인하고자 한다. 기온이 비교적 강한 공간적 일관성을 지닌다는 관점에서, 용이한 확인을 위해 기온의 유역평균을 계산하여 자기상관 및 교차상관 그림을 얻는다. 그림 17-18은 일최고/최저기온의 유역평균의 자기상관을 나타내는데, 전반적으로 그 특성이 잘 재현되고 있는 것으로 보인다. 한편, 그림 19-21은 기온과 강수 간, 일최고기온과 일최저기온 간 교차상관을 나타낸다. 그림에서 부분적으로 유의한 차이가 나타나고 있으나, 전반적으로 주요한 특징이 재현되는 것으로 판단된다.

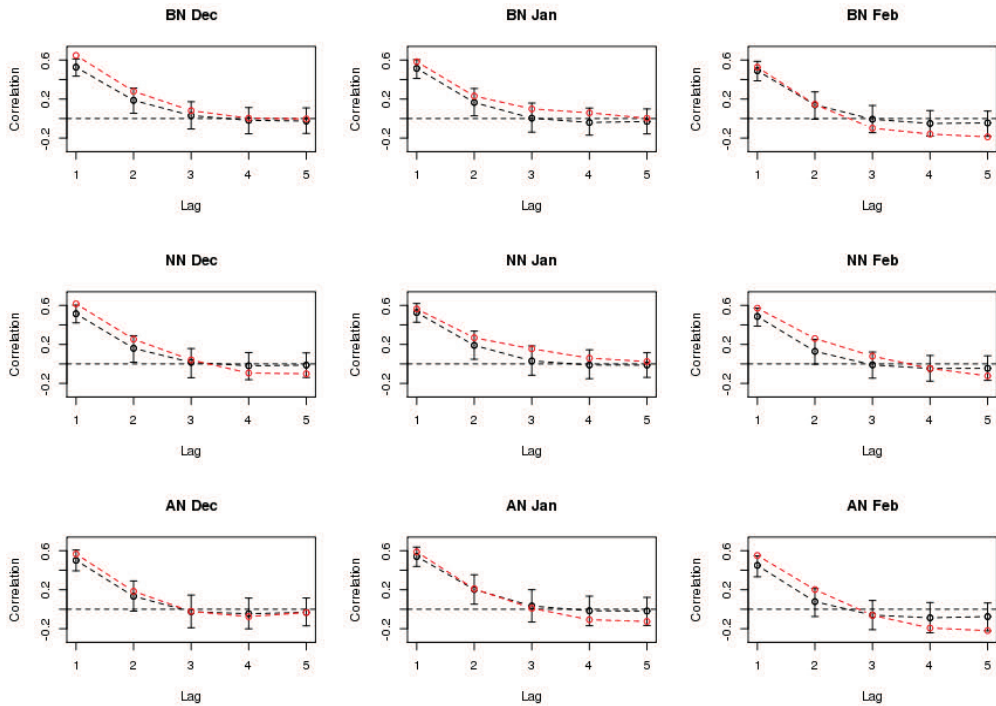


그림 17. 각 문순범주와 월에 대한 일최고기온 시간적 자기상관그림. 시차(lag)의 단위는 일이다. 상세화 자료의 자기상관계수는 흑색, 관측의 것은 적색으로 표시하였다. 흑색구간은 상세화 자료로부터 얻어진 95% 수준 신뢰구간이다. 전반적으로 자기상관이 재현되는 것으로 판단된다.

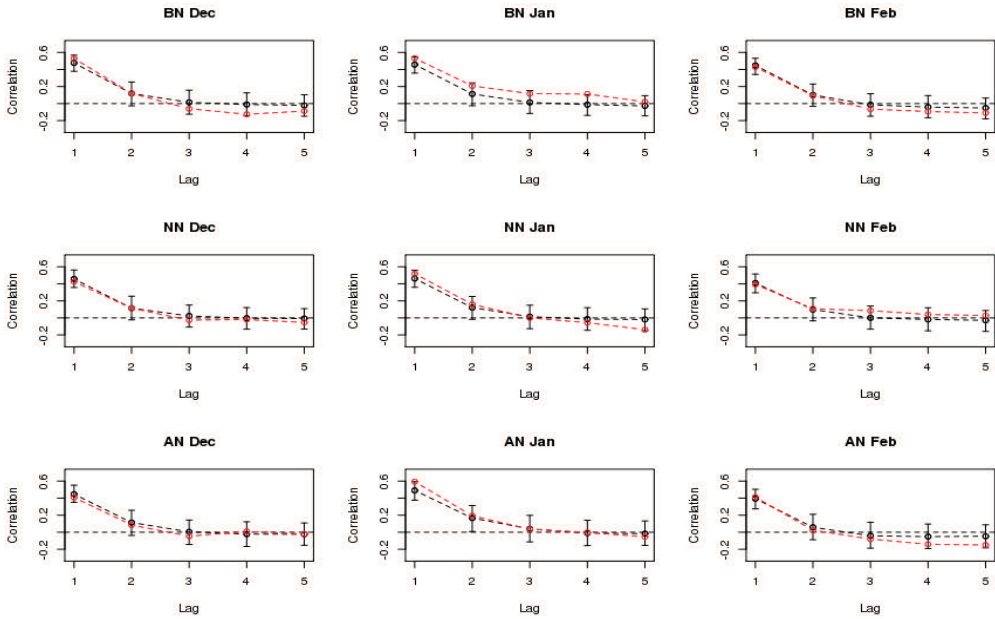


그림 18. 각 몬순범주와 월에 대한 일최저기온 시간적 자기상관그림. 시차(lag)의 단위는 일이다. 상세화 자료의 자기상관계수는 흑색, 관측의 것은 적색으로 표시하였다. 흑색구간은 상세화 자료로부터 얻어진 95% 수준 신뢰구간이다. 전반적으로 자기상관이 잘 재현되는 것으로 판단된다.

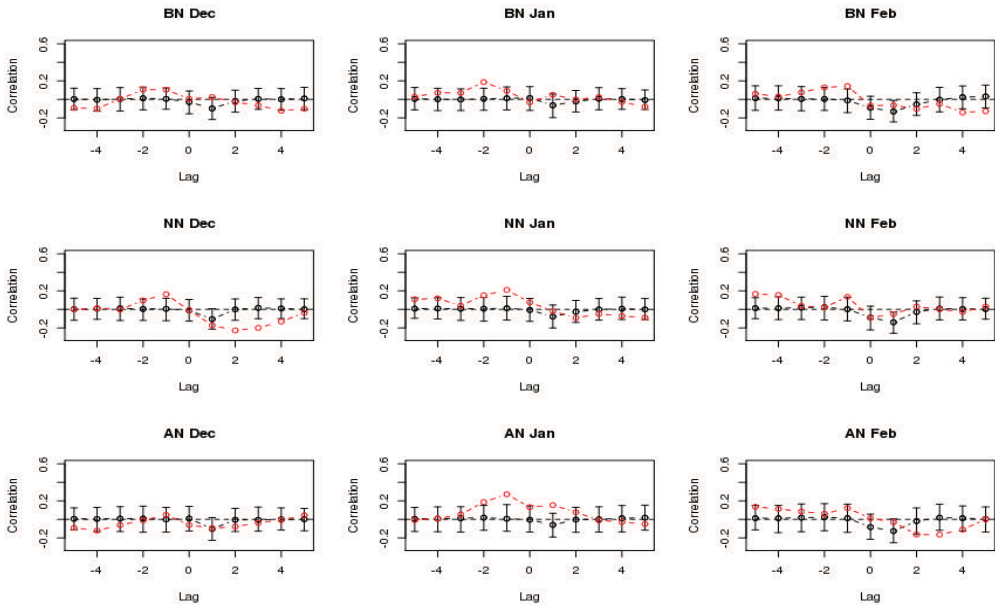


그림 19. 각 몬순범주와 월에 대한 일최고기온과 강수 간 교차상관그림. 흑색은 상세화자료, 적색은 관측의 교차상관계수이다. Lag는 일단위 강수의 시점(일단위)을 의미한다. Lag > 0: 과거시점, Lag < 0: 미래시점, Lag=0은 동일시점. 부분적으로 유의한 차이가 나타나지만, 교차상관의 주요한 특징은 재현되는 것으로 판단된다.

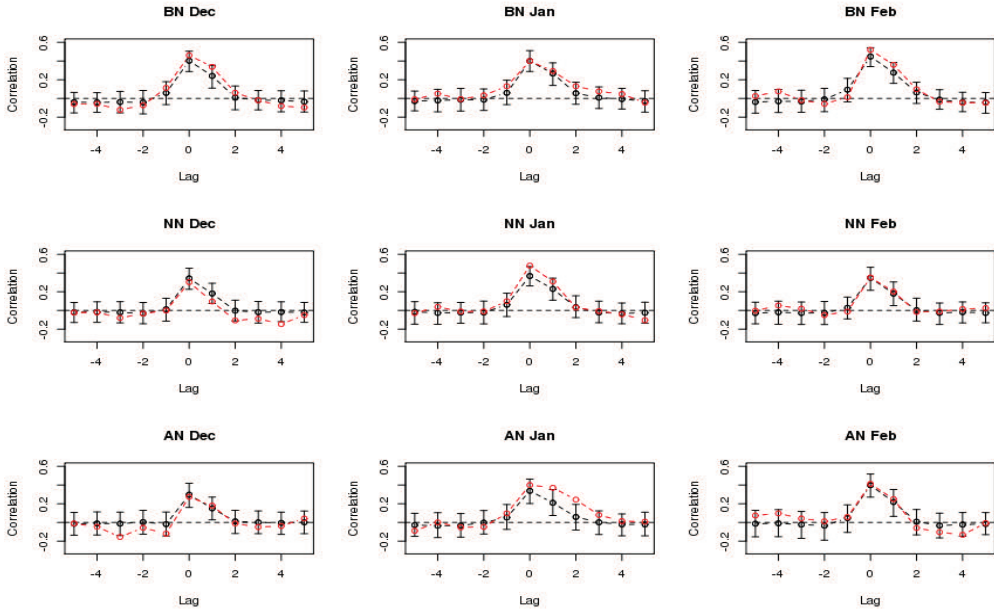


그림 20. 각 몬순범주와 월에 대한 일최저기온과 강수 간 교차상관그림. 흑색은 상세화자료, 적색은 관측의 교차상관계수이다. Lag는 강수의 시점(일단위)을 의미한다. Lag > 0: 과거시점, Lag < 0: 미래시점, Lag=0은 동일시점. 전반적으로 교차상관의 주요한 특징이 재현되는 것으로 판단된다.

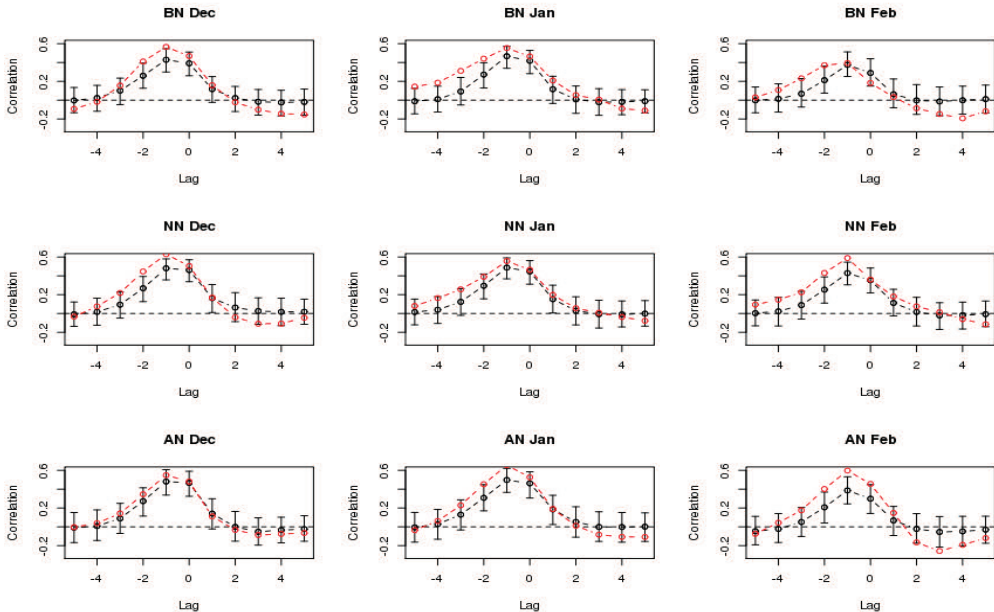


그림 21. 각 몬순범주와 월에 대한 일최고기온과 일최저기온 간 교차상관그림. 흑색은 상세화자료, 적색은 관측의 교차상관계수이다. Lag는 일최저기온의 시점(일단위)을 의미한다. Lag > 0: 과거시점, Lag < 0: 미래시점, Lag=0은 동일시점. 전반적으로 교차상관의 주요한 특징이 재현되는 것으로 판단된다.

3.2.1.5 기온의 계절 평균, 강수의 계절 누적량

상세화 자료는 몬순범주에서 발생 가능한 계절날씨를 표현한 것으로, 지금까지 주로 일시간단위의 통계적 특성을 관측과 비교하였다. 이제, 계절시간단위의 특성을 살피고자 한다. 각 몬순범주에 대해 상세화 자료와 관측자료의 일최고/최저기온의 계절평균, 강수의 계절누적량을 계산하여 비교한다. 그림 22은 비교결과는 나타낸 것으로 몬순범주별로 계절적 특성이 잘 재현되는 것을 확인할 수 있다. 정량적 비교를 위해 평균비교를 위해 t-검정, 분산비교를 위해 카이제곱검정을 고려한다. 단, 강수의 경우에는 비정규성을 감안해서 적절한 Box-Cox변환을 적용한다. 표 8은 검정의 유의확률을 제시하는데, 유의수준 5% 기준으로 계절적 특성이 재현되고 있음을 재확인할 수 있다.

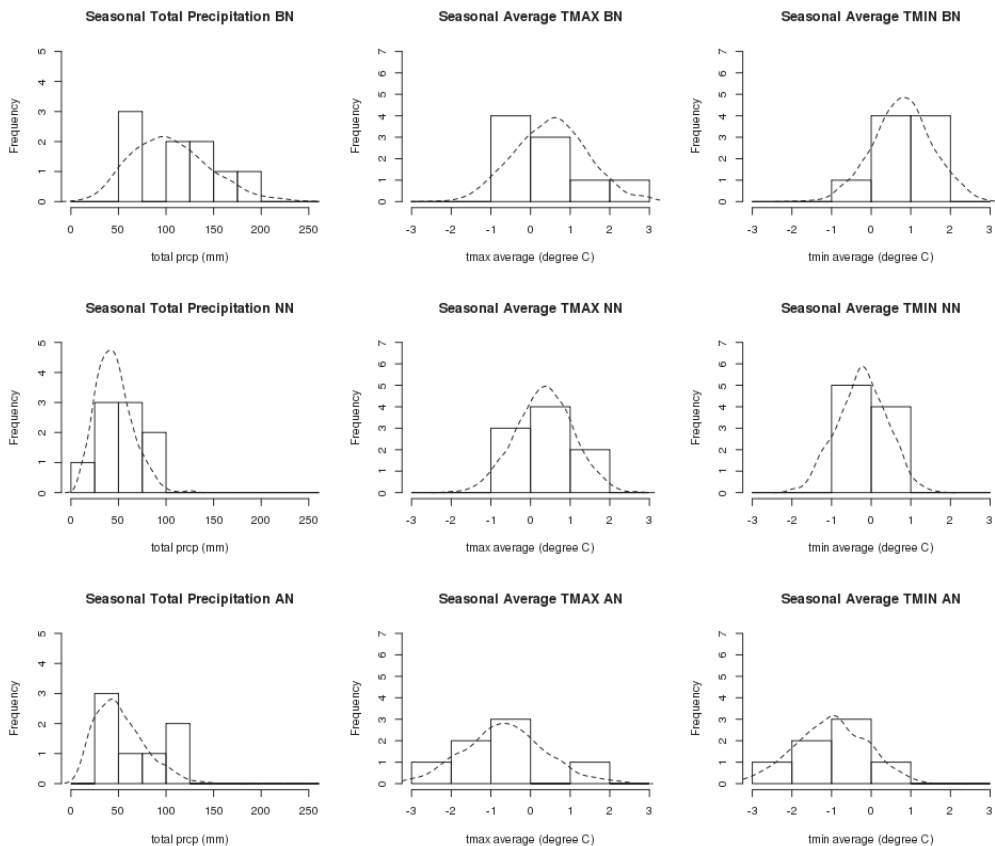


그림 22. 몬순범주에 따른 강수와 기온의 계절누적 및 평균의 분포 비교. 히스토그램은 관측, 파선은 상세화 자료의 분포이다. 계절적 특성이 잘 재현되고 있다.

표 8. 몬순범주에 따른 강수와 기온의 계절누적 및 평균의 분포 비교의 t-검정(평균비교)과 카이제곱검정(분산비교)의 유의확률. 누적강수는 비정규성을 감안하여 적절히 Box-Cox 변환을 적용하였다. 유의수준 5%기준으로 관측분포가 잘 재현되고 있음을 재확인할 수 있다.

	강수 계절누적		일최고기온 계절평균		일최저기온 계절평균	
	t-검정	χ^2 -검정	t-검정	χ^2 -검정	t-검정	χ^2 -검정
BN	54%	30%	68%	53%	68%	79%
NN	13%	53%	96%	43%	62%	56%
AN	46%	12%	70%	35%	70%	62%

3.2.2 WebsterYang92지수 상세화 자료 검증 결과

WebsterYang92지수 상세화 자료에 대해서도 동일한 방식으로 검증을 실시한다. 아래에서 그 결과 위주로 설명한다.

3.2.1.1 일별분포와 무강수확률

강수와 기온에 대한 카이제곱적합도검정법과 K-S 검정법에 의한 결과, 표 9에서처럼 대부분의 경우에서 상세화자료와 관측자료 간 일별분포의 차이가 유의하지 않은 지점이 대다수였다. 하지만, 몬순범주 BN의 8월에서 일최고기온의 일별분포가 6개 지점에서 유의한 차이를 보였다. 전반적으로 8월 일최고기온의 일별분포가 그림 23에서 보이듯이 약간 왜곡되어 재현되는 것으로 보인다. 향후 연구에서 이에 대한 보강이 필요해 보인다. 한편, 그림 24에서 확인되듯이, 무강수확률은 모든 몬순범주에서 잘 재현되고 있다.

표 9. 유의수준 5%에서 유의한 일별분포차이를 보인 지점 수(총지점수:14개)

범주	월	강수	일최고기온	일최저기온
BN	6	0	0	0
	7	0	0	1
	8	0	6	0
NN	6	0	0	0
	7	4	1	0
	8	2	2	0
AN	6	1	0	0
	7	0	0	0
	8	0	0	0

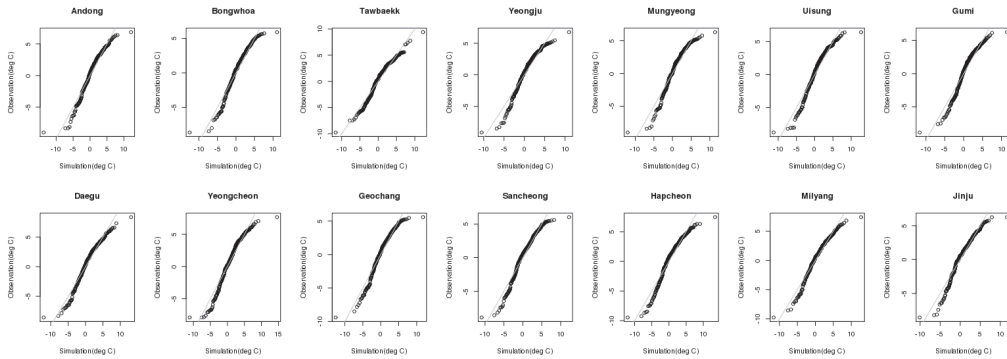


그림 23. 몬순범주가 BN일 때, 8월 일최고기온 일별분포의 비교. 영주, 구미, 거창, 산청, 함천, 진주에서 유의수준 5%에서 차이가 있는 것으로 나타난다. 전반적으로, 일별분포가 약간 왜곡되어 재현되는 것으로 보인다.

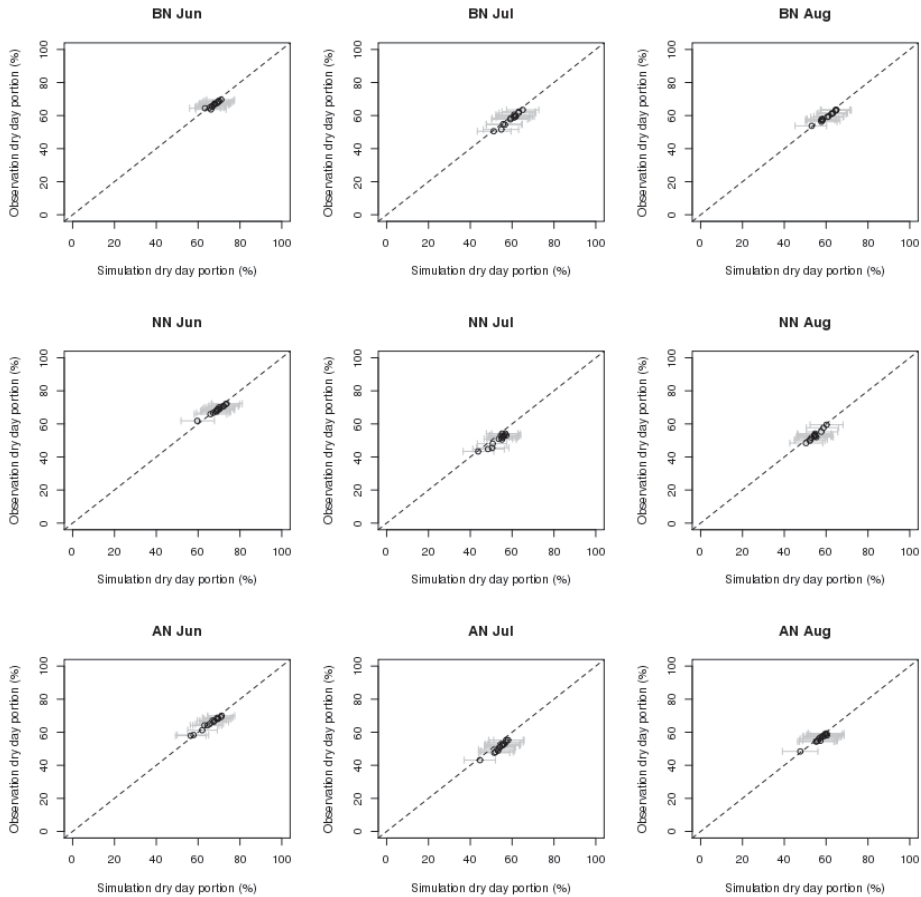


그림 24. 각 몬순범주와 달에 대한 각 지점의 무강수확률(%)의 비교. 회색구간은 상세화 자료로부터 얻어진 95% 신뢰구간을 뜻한다. 전반적으로 무강수확률이 잘 재현되고 있다.

3.2.1.2 공간상관, 시간적 자기상관 및 교차상관

그림 25-27은 강수, 일최고/최저기온의 상세화 자료와 관측자료 간 공간상관을 비교한다. 몇몇의 경우 공간상관이 조금 약하게 재현되고 있으나, 전반적으로 잘 재현되고 있는 것으로 판단된다. 한편 시간적 자기상관과 교차상관의 재현여부는 그림 28-32에서 확인할 수 있다. 부분적으로 상관계수의 유의한 차이가 나타나지만, 전반적으로 주요한 상관특징이 재현되고 있는 것으로 보인다.

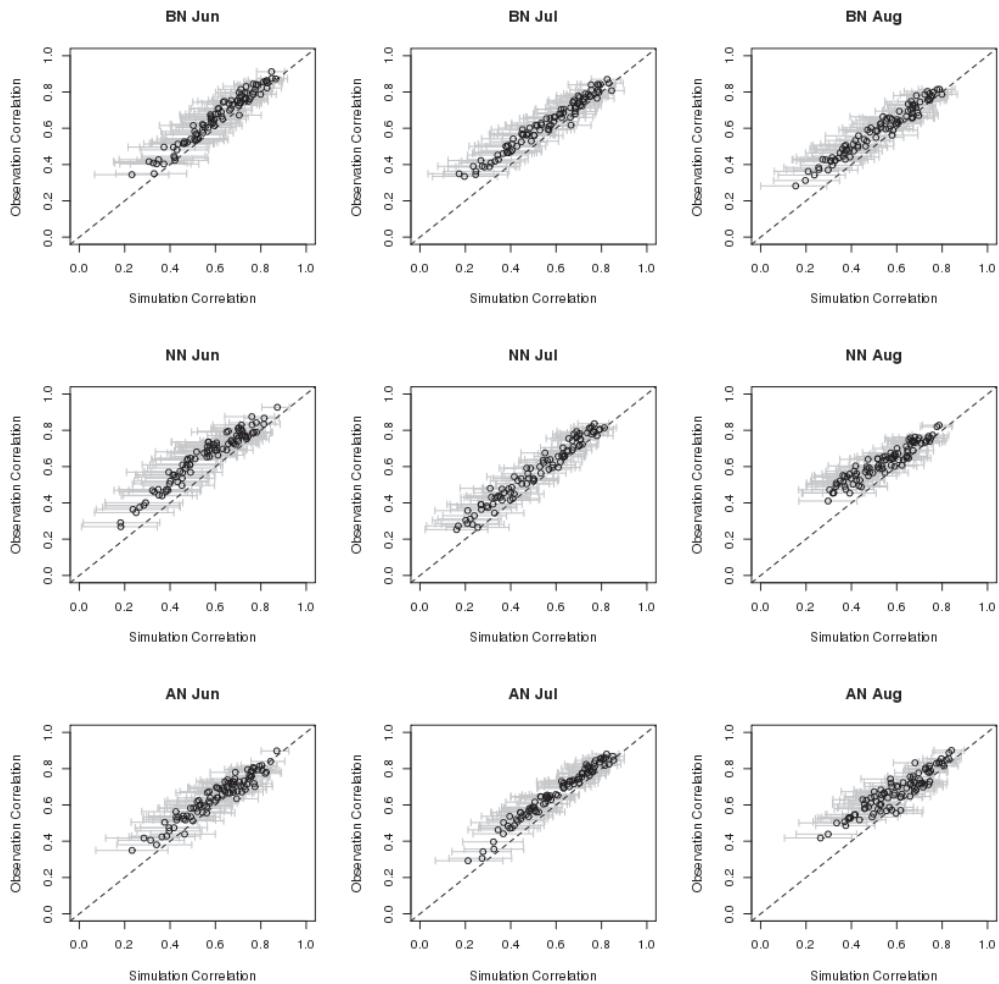


그림 25. 각 문순범주와 달에 대해서 강수의 공간상관 비교. 전반적으로 관측의 공간상관이 잘 재현되는 것으로 보인다.

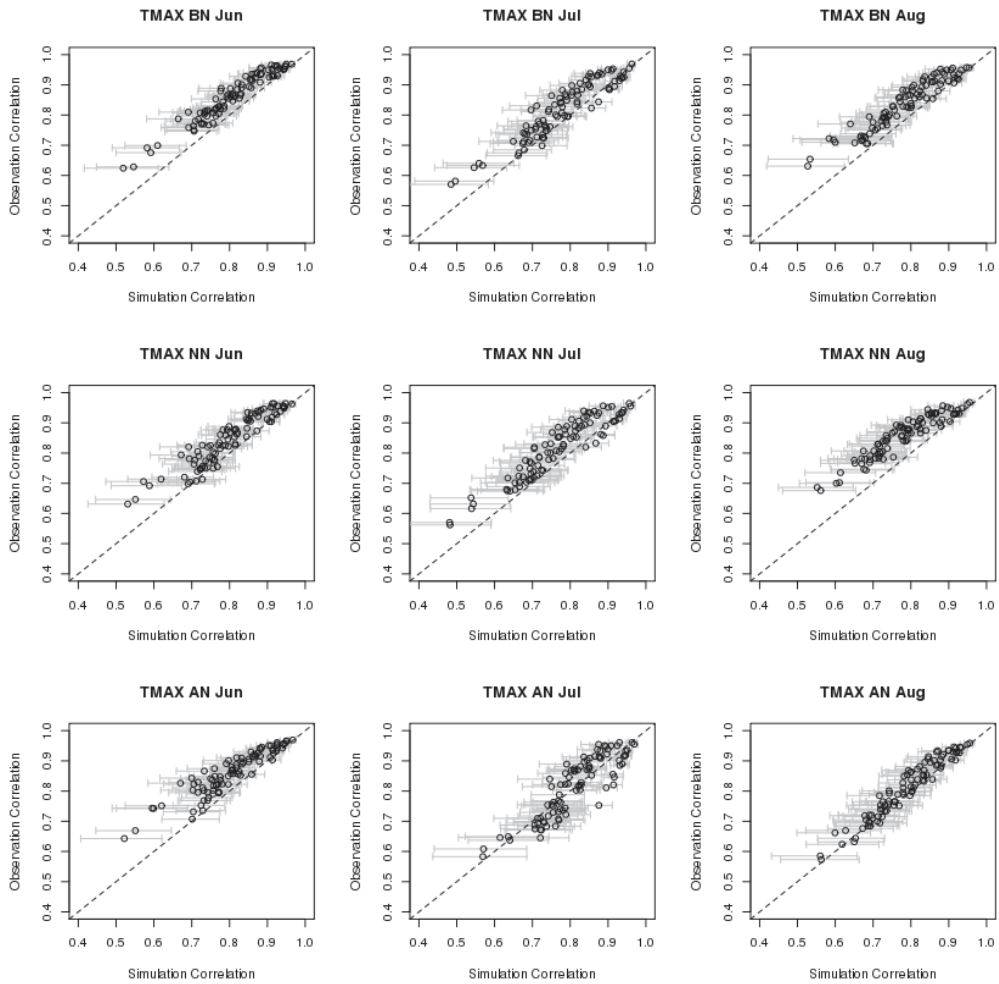


그림 26. 각 몬순범주와 달에 대해서 일최고기온의 공간상관 비교. 전반적으로 관측의 공간상관이 잘 재현되는 것으로 보인다.

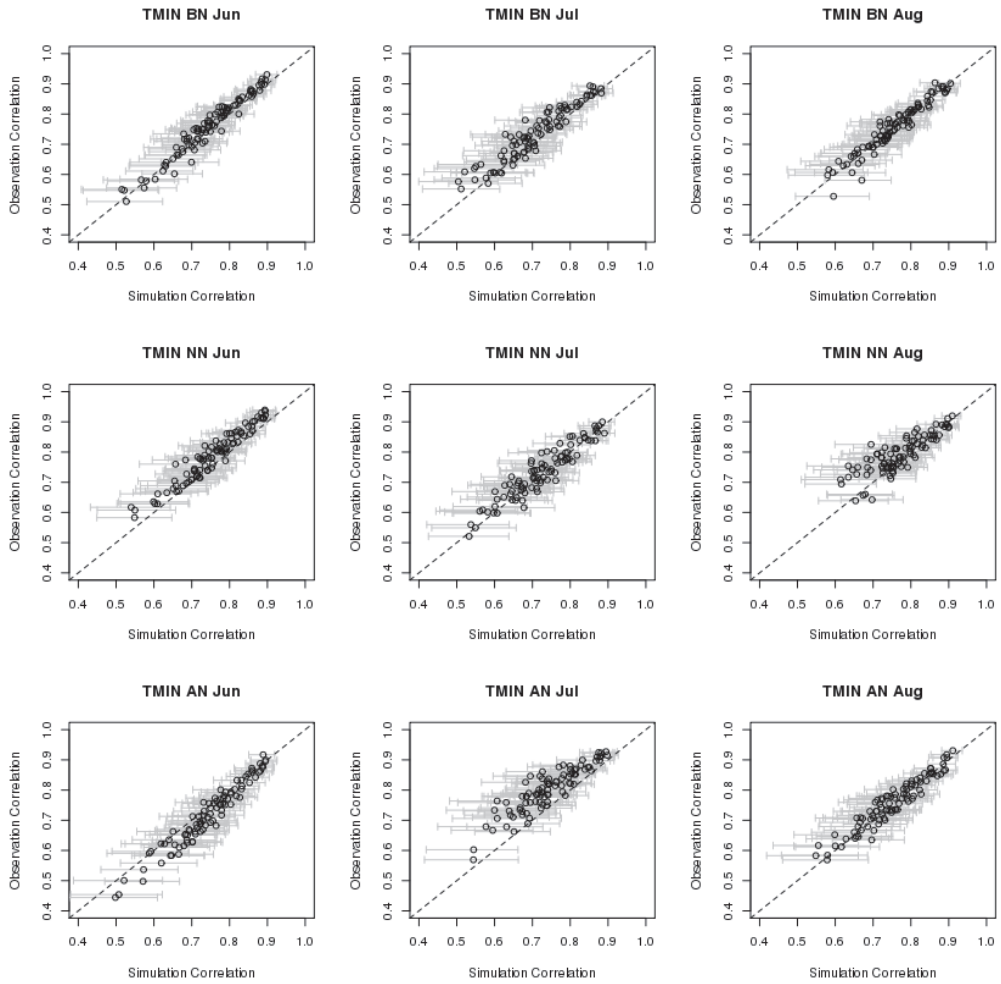


그림 27. 각 몬순범주와 달에 대해서 일최저기온의 공간상관 비교. 전반적으로 관측의 공간상관이 잘 재현되는 것으로 보인다.

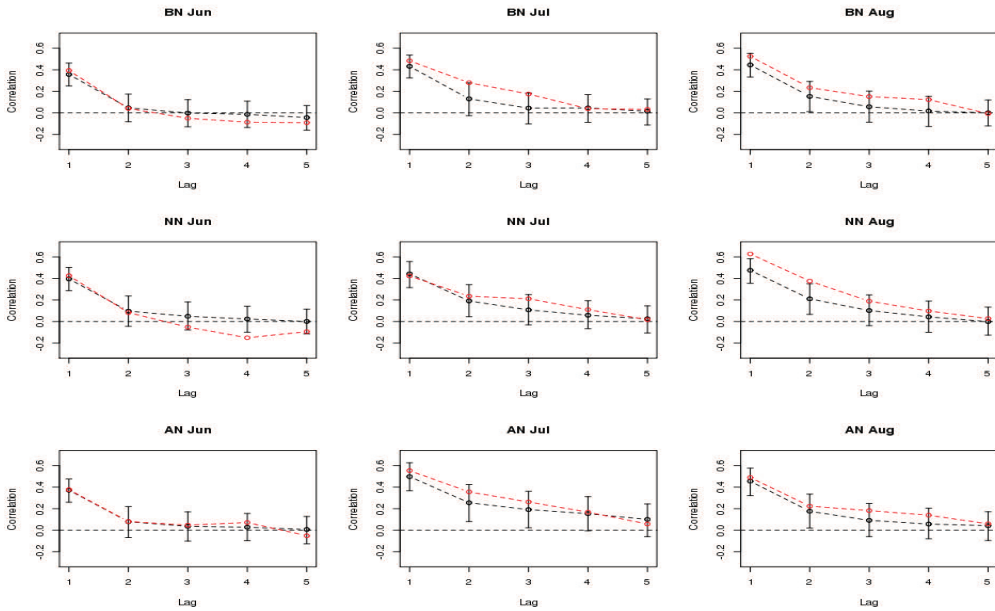


그림 28. 각 몬순범주와 월에 대한 일최고기온 시간적 자기상관그림. 시차(lag)의 단위는 일이다. 상세화 자료의 자기상관계수는 흑색, 관측의 것은 적색으로 표시하였다. 흑색구간은 상세화 자료로부터 얻어진 95% 수준 신뢰구간이다. 전반적으로 자기상관이 재현되는 것으로 판단된다.

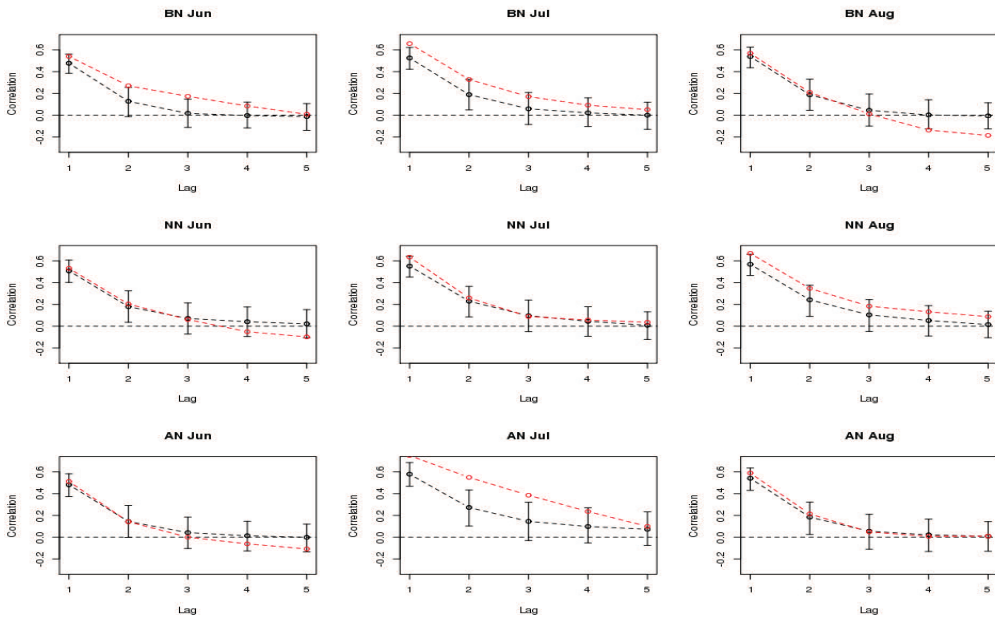


그림 29. 각 몬순범주와 월에 대한 일최저기온 시간적 자기상관그림. 시차(lag)의 단위는 일이다. 상세화 자료의 자기상관계수는 흑색, 관측의 것은 적색으로 표시하였다. 흑색구간은 상세화 자료로부터 얻어진 95% 수준 신뢰구간이다. 전반적으로 자기상관이 재현되는 것으로 판단된다.

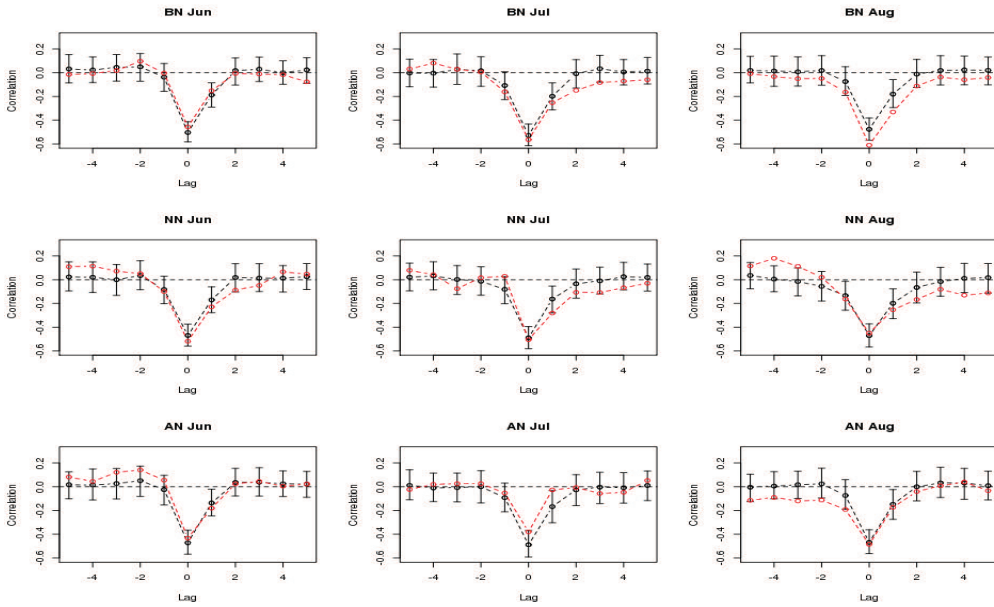


그림 30. 각 몬순범주와 월에 대한 일최고기온과 강수 간 교차상관그림. 흑색은 상세화자료, 적색은 관측의 교차상관계수이다. Lag는 강수의 시점(일단위)을 의미한다. Lag > 0: 과거시점, Lag < 0: 미래시점, Lag=0은 동일시점. 전반적으로 교차상관의 주요한 특징이 재현되는 것으로 판단된다.

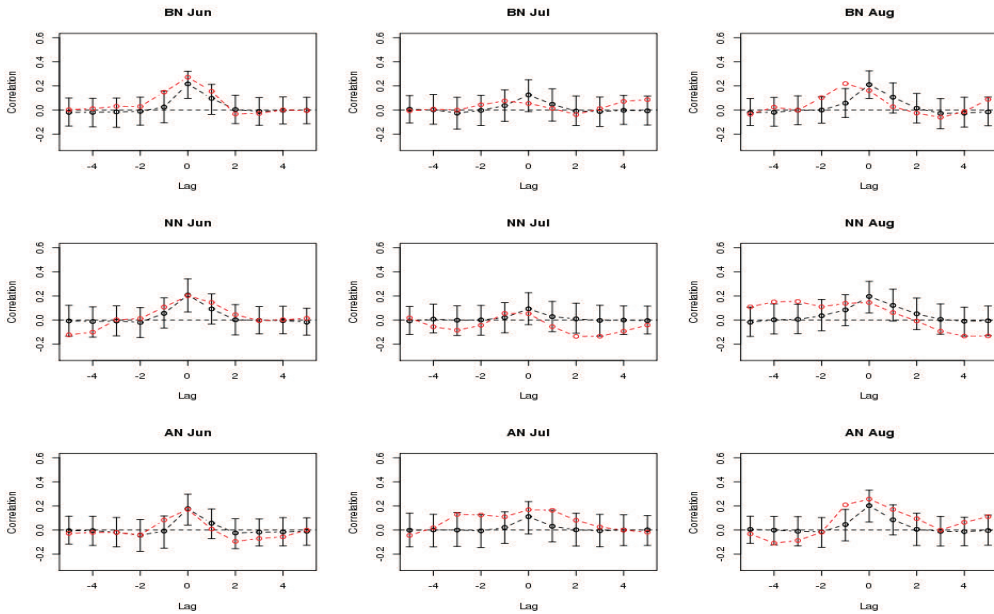


그림 31. 각 몬순범주와 월에 대한 일최저기온과 강수 간 교차상관그림. 흑색은 상세화자료, 적색은 관측의 교차상관계수이다. Lag는 강수의 시점(일단위)을 의미한다. Lag > 0: 과거시점, Lag < 0: 미래시점, Lag=0은 동일시점. 전반적으로 교차상관의 주요한 특징이 재현되는 것으로 판단된다.

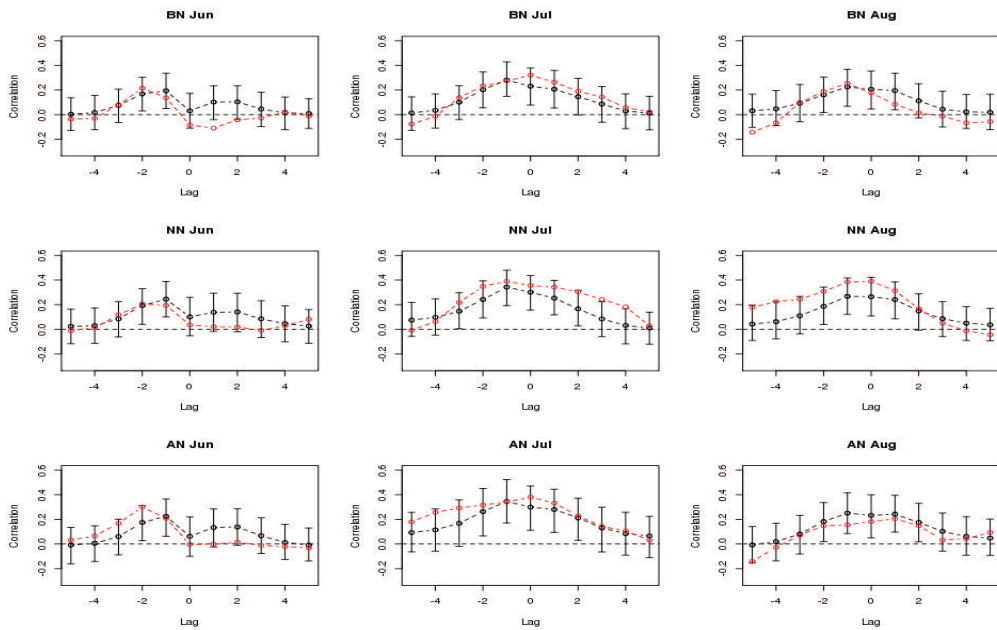


그림 32. 각 문순범주와 월에 대한 일최고기온과 일최저기온 간 교차상관그림. 흑색은 상세화자료, 적색은 관측의 교차상관계수이다. Lag는 일최저기온의 시점(일단위)을 의미한다. Lag > 0: 과거시점, Lag < 0: 미래시점, Lag=0은 동일시점. 전반적으로 교차상관의 주요한 특징이 재현되는 것으로 판단된다.

3.2.1.3 기온의 계절 평균, 강수의 계절 누적량

마지막으로, 몬순범주에 따른 여름철 계절특성의 재현여부를 확인한다. 그림 33과 표 10은 몬순범주에 따른 기온의 계절평균, 강수의 계절누적량의 분포를 비교하는데, 관측의 분포특징이 잘 재현되는 것으로 확인된다. 그러므로, 우리는 상세화자료가 각 몬순범주의 계절적 특징을 잘 재현하는 것으로 결론 내린다.

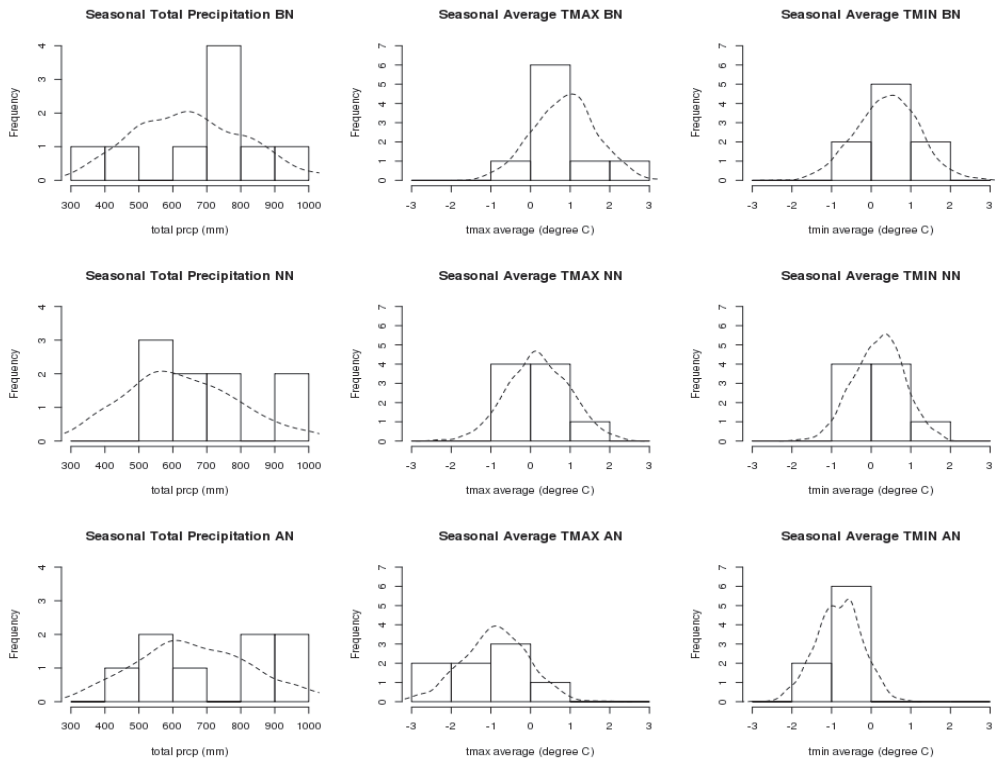


그림 33. 몬순범주에 따른 강수와 기온의 계절누적 및 평균의 분포 비교. 히스토그램은 관측, 파선은 상세화 자료의 분포이다. 계절적 특성이 잘 재현되고 있다.

표 10. 몬순범주에 따른 강수와 기온의 계절누적 및 평균의 분포 비교의 t-검정(평균비교)과 카이제곱검정(분산비교)의 유의확률. 누적강수는 비정규성을 감안하여 적절히 Box-Cox 변환을 적용하였다. 유의수준 5%기준으로 관측분포가 유의한 차이를 보이지 않고 재현되고 있음을 재확인할 수 있다.

	강수 계절누적		일최고기온 계절평균		일최저기온 계절평균	
	t-검정	χ^2 -검정	t-검정	χ^2 -검정	t-검정	χ^2 -검정
BN	44%	36%	77%	16%	79%	53%
NN	20%	57%	73%	45%	86%	48%
AN	54%	30%	82%	17%	67%	47%

4. 결론 및 토론

4.1 결론

본 연구에서 낙동강 유역을 대상으로 겨울과 여름에 대해 동아시아 몬순의 통계적 상세화 방법을 고려하였다. 효과적인 상세화를 위해서는, 우선 예측성을 지니는 몬순지수의 선별이 필요하다. 각 계절에 대해서 많은 몬순지수가 제안되었으나 각기 다른 예측성을 보인다. 여러 몬순지수의 예측성을 평가한 결과, 겨울에는 LiYang10지수가, 여름에는 WebsterYang92지수가 예측성을 보여서, 이들을 상세화의 기반지수로 선정하였다. 한편, Weather Generator는 예측된 몬순범주에서 유역기상을 재현하는 역할을 하는데, 검증결과 유역기상의 여러 통계적 특성을 전반적으로 잘 재현하는 것으로 판단된다. 그래서, 우리는 제안된 상세화 방법이 두 계절에 대해서 적절한 상세화 자료를 생산하는 것으로 결론내린다.

4.2 토론

본 보고서가 제안한 방법은 통계학적 관점을 취하고 있기에 기후의 정상성(stationarity)를 전제하고 있다는 점을 유념해야 할 것이다. 특히, 기후의 장주기 변동으로 인해 몬순예측성이 달라질 수 있어, 예측모형을 세울 때 주의를 기울일 필요가 있다.

본 연구에서 겨울과 여름을 대상으로 상세화 방법은 연구하였다. 겨울의 경우 LiYang10지수가 유역의 기온과 강수를 잘 설명해주고 있다. 하지만 소수의 참여모형만이 그 지수에 대한 예측성을 보이고 있는데, 이는 참여모형 고유의 계통적 편의(systematic bias)로 인한 것일 수 있다. 향후 연구에서 편의보정을 통해 다수의 참여모형에서 안정적인 예측성을 얻을 수 있는 몬순예측에 대한 연구가 필요하겠다. 한편 여름의 경우, 최종적으로 선정된 WebsterYang92지수조차 여름 강수를 잘 설명하고 있지 못하다. 특히, 여름은 대상유역에서 강수가 집중되는 시기이기 때문에 강수에 대한 설명력이 매우 요구된다. 향후 연구에서 여름강수를 잘 설명할 수 있는 대규모 순환 탐색이 필요하다.

본 보고서에서 겨울과 여름을 대상으로 한 이유는 유역기후에 영향을 주는 뚜렷한 문순순환이 있기 때문이다. 그런데 봄과 가을에 대해서는 뚜렷한 대규모순환이 아직 알려지지 않았다. 이 두 계절에 대해서는 보다 심도 깊은 대규모순환 탐색이 필요할 것으로 사려된다. 향후 연구에서 봄과 가을의 대규모순환 탐색과 상세화 방법 연구를 진행할 계획이다.

본 연구에서 제안한 방법은 Weather Generator의 재현성능이 상세화 자료의 효용성에 결정적인 영향을 미치기 때문에 그 역할이 중요하다. 앞서 상세화 자료의 검증을 통해 제안된 Weather Generator의 성능을 확인하였으나, 이 외에도 여러 연구에서 다양한 동기와 방식으로 Weather Generator가 개발되어 왔다(cf. Apipattanvis et al., 2007; Eum et al., 2010; Srivastav and Simonovic, 2015). 향후 연구에서 이들과 비교를 통해 지속적인 Weather Generator 통계모형의 개선과 상세화 방법 개발이 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 계절예측이 월단위로 가용한 경우를 고려하였다. 한편, Jeong et al. (2012)와 Jeong et al. (2013)에서는 GCM의 일별예측자료가 가용한 경우에서 통계적 상세화 방법을 연구하였다. 하지만, 개별모형의 예측성은 한계를 지니고 있고 제공할 수 있는 앙상블의 개수도 현실적으로 제한되어 있다. 반면에, 본 연구의 방법으로는 다양한 상세화 자료를 얻을 수 있어 농업의 작물생산량과 수자원의 유출량과 같은 목표변수의 확률분포계산에 유리하다. 이러한 방법의 특성은 상세화 방법의 기후응용연구 활용에 있어 중요한 장점이다.

REFERENCES

- Apipattanavis, S., G. Podestá, B. Rajagopalan, and R. W. Katz, 2007: A semiparametric multivariate and multisite weather generator. *Water Resour. Res.*, 43, doi:10.1029/2006WR005714.
- Bosq, D., 2000: *Linear Processes in Function Spaces: Theory and Applications*, vol. 149 of *Lecture Notes in Statistics*. Springer-Verlag, New York,.
- Chan, J. C., and C. Y. Li, 2004: The East Asia winter monsoon. *East Asian Monsoon*, C.P. Chang, Ed., Singapore, World Scientific, 54-106.
- Eum, H.-I., S. P. Simonovic, and Y.-O. Kim, 2010: Climate Change Impact Assessment Using K-Nearest Neighbor Weather Generator: Case Study of the Nakdong River Basin in Korea. *J. Hydrol. Eng.*, 15, 772-785, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000251.
- Gong, D.-Y., S.-W. Wang, and J.-H. Zhu, 2001: East Asian winter monsoon and arctic oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2073-2076.
- He, M., W. L. Song, and L. Xu, 2001: Definition of the South China Sea monsoon index and associated prediction. Dates of Summer Monsoon Onset in the South China Sea and Monsoon indices, J.H. He, Y.H. Ding, and H. Gao, Eds., China Meteorological Press, 109-110.
- Jeong, D. I., A. St-Hilaire, T. B. M. J. Ouarda, and P. Gachon, 2012: A multivariate multi-site statistical downscaling model for daily maximum and minimum temperatures. *Clim. Res.*, 54, 129-148, doi:10.3354/cr01106.
- Jeong, D. I., A. St-Hilaire, T. B. M. J. Ouarda, and P. Gachon, 2013: A multi-site statistical downscaling model for daily precipitation using global scale GCM precipitation outputs. *Int. J. Climatol.*, 33, 2431-2447, doi:10.1002/joc.3598.
- Kim, S., S.-J. Sohn, and J.-S. Kug, 2017: Winter temperatures over the Korean Peninsula and East Asia: development of a new index and its application to seasonal forecast. *Clim. Dyn.*, 49, 1567-1581.
- Lau, K. M., K. M. Kim, and S. Yang, 2000: Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon. *J. Clim.*, 13, 2461-2482.
- Li, Y., and S. Yang, 2010: A dynamical index for the East Asian winter monsoon. *J. Clim.*, 23, 4255-4262.
- Lütkepohl, H., 1991: *Introduction to Multiple Time Series Analysis*. 2nd Ed. Springer-Verlag, Berlin,.

- Min, Y.-M., V. N. Kryjov, S. M. Oh, and H.-J. Lee, 2017: Skill of real-time operational forecasts with the APCC multi-model ensemble prediction system during the period 2008–2015. *Clim. Dyn.*, doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-017-3576-2>.
- Semenov, M. A., R. J. Brooks, E. M. Barrow, and C. W. Richardson, 1998: Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Clim. Res.*, 10, 95–107, doi:10.3354/cr010095.
- Shi, N., 1996: Feature of the East Asian winter monsoon intensity on multiple time scale in recent 40 years and their relation to climate. *Quart. J. Appl. Meteor.*, 7, 175–182.
- Shi, N., and Q. Zhu, 1996: an Abrupt Change in the Intensity of the East Asian Summer Monsoon Index and Its Relationship with temperature and precipitation over East China. *Int. J. Climatol.*, 16, 757–764.
- Srivastav, R. K., and S. P. Simonovic, 2015: Multi-site, multivariate weather generator using maximum entropy bootstrap. *Clim. Dyn.*, 44, 3431–3448, doi:10.1007/s00382-014-2157-x.
- Wang, B., and Z. Fan, 1999: Choice of South Asian Summer Monsoon Indices. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 80, 629–638.
- Wang, B., R. Wu, and K.-M. Lau, 2001: Interannual variability of Asian summer monsoon: Contrast between the Indian an western North Pacific–East Asian monsoons. *J. Clim.*, 14, 4073–4090.
- Wang, B., Z. Wu, J. Li, J. Liu, C.-P. Chang, Y. Ding, and G. Wu, 2008: How to Measure the Strength of the East Asian Summer Monsoon. *J. Clim.*, 21, 4449–4463.
- Wang, L., W. Chen, W. Zhou, and R. Huang, 2009: Interannual variations of East Asian trough axis at 500 hPa and its association with the East Asian winter monsoon pathway. *J. Clim.*, 22, 600–614.
- Wang, L., and W. Chen, 2014: An intensity index for the East Asian winter monsoon. *J. Clim.*, 27, 2361–2374.
- Wang, Q., Y. H. Ding, and Y. Jiang, 1998: Relationship between Asian monsoon activities and the precipitation over China mainland. *J. Appl. Meteor.*, 9, 84–89.
- Webster, P. J., and S. Yang, 1992: Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 118, 877–926.
- Weigel, A. P., M. A. Liniger, and C. Appenzeller, 2007: Generalization of the Discrete Brier and Ranked Probability Skill Scores for Weighted Multimodel Ensemble Forecasts. *Mon. Weather Rev.*, 135, 2778–2785.

- Wu, A. M., and Y. Q. Ni, 1997: The influence of Tibetan Plateau on the interannual variability of Asian monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, 14, 491-504.
- Wu, B.-Y., and J. Wang, 2002: Winter arctic oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2002GL015373.
- Xu, S. Y., and J. J. Ji, 1965: The climate and weather features during the outbreak period of China's winter monsoon. *Geogr. Symp.*, 9, 85-101.
- Zhang, Q. Y., S. Y. Tao, and L. T. Chen, 2003: The interannual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. *Acta Meteor. Sin.*, 61, 559-568.
- Zhao, P., and Z. J. Zhou, 2005: East Asian subtropical summer monsoon index and its relationships to rainfall. *Acta Meteor. Sin.*, 63, 933-941.

부록

A.1 강수량 모형

본문의 강수량 모형의 세부내용을 설명한다.

지점 강수량 분포

p_j 가 지점 s_j 의 습윤일 무강수확률, α_j 와 μ_j 가 각각 감마분포의 형태모수와 평균일 때, 지점의 강수량누적분포함수는

$$F_j(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ p_j, & x = 0, \\ p_j + (1 - p_j)G(x; \alpha_j, \mu_j), & x > 0, \end{cases} \quad (4)$$

단, $G(x; \alpha_j, \mu_j)$ 는 형태모수 α_j 이고 평균이 μ_j 인 감마분포의 누적분포함수이다.

Gaussian-copula 모형

다지점 강수량 분포에 대한 통계모형으로 Gaussian-copula 모형을 고려한다: $R(s_1), \dots, R(s_d)$ 가 지점 s_1, \dots, s_d 의 습윤일 강수량이라고 하자.

$$(Z_1, \dots, Z_d) \sim N(\mathbf{0}, \Sigma), \quad (U_1, \dots, U_d) = (\Phi(Z_1), \dots, \Phi(Z_d)) \quad (5)$$

일 때, $\max\{F_1^{-1}(U_1), \dots, F_d^{-1}(U_d)\} > 0$ 일 조건부로

$$(R(s_1), \dots, R(s_d)) \sim (F_1^{-1}(U_1), \dots, F_d^{-1}(U_d)). \quad (6)$$

단, Φ 는 표준정규분포의 누적분포함수이고 F_j^{-1} 는 F_j 의 분위수함수이다($j = 1, \dots, d$). 이 모형에서 지점 간 강수량의 상관은 공분산행렬 Σ 에 의해 결정된다.

강수패턴

낙동강 유역 다지점 강수량의 EOF분석에 의하면 basin-wide 모드와 남북으로 대비된 dipole 모드가 주요공간변동모드로 나타난다. 이 관점에서 우리는 낙동강 유역 14지점 중 북부 7지점 s_1, \dots, s_7 과 남부 7지점 s_8, \dots, s_{14} 에 대해서,

$$P_1 = A_1 + A_2, P_2 = \begin{cases} (A_1 - A_2)/(A_1 + A_2), & P_1 > 0; \\ 0, & P_1 = 0, \end{cases} \quad (7)$$

여기서, $A_1 = \{R(s_1) + \dots + R(s_7)\}/7$, $A_2 = \{R(s_8) + \dots + R(s_{14})\}/7$ 이다. P_1 은 basin-wide 모드, P_2 는 dipole 모드에 대응한다. $i = 1, 2$ 에 대해서 q_{i1} 과 q_{i2} 를 각각 모드 P_i 의 첫 번째와 두 번째 삼분위수라고 할 때, 표11과 같이 강수패턴을 정의한다:

표 11. 강수모드에 따른 강수패턴

패턴번호	$0 < P_1 \leq q_{11}$	$q_{11} < P_1 \leq q_{12}$	$q_{12} < P_1 < \infty$
$-1 \leq P_2 \leq q_{21}$	1	4	7
$q_{21} < P_2 \leq q_{22}$	2	5	8
$q_{22} < P_2 \leq 1$	3	6	9

단, $P_1 = 0$ 일 때, 패턴번호를 0으로 정의한다.

습윤기 생성모형의 모수와 상세화

습윤기 생성모형의 모수를 정리하면, 아래 표 12와 같다. 상세화를 위해서 건조기 지속일의 음이항분포의 모수와 더불어 이들 모수를 몬순범주에 따라 구분하여 추정한다.

표 12. 습윤기 생성모형의 모수. 몬순범주에 따라 구분하여 추정한다.

모수	의미
p_1, \dots, p_d	습윤일 무강수확률
$\alpha_1, \dots, \alpha_d, \mu_1, \dots, \mu_d$	감마분포 모수
Σ	Gaussian-copula 모형의 공분산 행렬
$q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}$	강수모드의 삼분위수

습윤기생성 알고리즘

몬순범주가 주어졌을 때, 습윤기생성알고리즘을 소개한다. 알고리즘을 통해 과거 습윤기와 동일한 강수패턴의 새로운 것을 생성하고자 한다. 아래에서 등장하는 모든 모수는 주어진 몬순범주에 의해 결정되고, $\mathbf{R}(t) = (R(s_1, t), \dots, R(s_d, t))$ 이다.

습윤기생성 알고리즘

몬순범주가 주어지고, 습윤기가 시점 t_0 의 다음부터 시작한다고 하자. 아래 과정을 통해 새로운 습윤기를 생성한다:

1. 동일 몬순범주 기간에서 과거습윤기 $\mathbf{R}(t_1 + 1), \dots, \mathbf{R}(t_1 + m)$ 를 무작위로 추출한다.
2. $i = 1, \dots, m$ 에 대해, $\mathbf{R}^* = \mathbf{R}(t_1 + i)$ 라고 두고 하위알고리즘을 수행해 얻어진 다지점 강수량을 $\mathbf{R}^*(t_0 + i)$ 로 둔다.

하위알고리즘

1. $k = 1, \dots, 1000$ 에 대해, $N(\mathbf{0}, \Sigma)$ 로부터 $(Z_{k,1}^*, \dots, Z_{k,d}^*)$ 를 생성한다.
2. $k = 1, \dots, 1000$ 에 대해, $R_k^*(s_j) = F_j^{-1}(\Phi(Z_{k,j}^*))$, $j = 1, \dots, d$, 라고 둔다. 그러면 표본집합 $\{(R_k^*(s_1), \dots, R_k^*(s_d)) : k = 1, \dots, 1000\}$ 을 얻는다.
3. 이 표본집합에서 \mathbf{R}^* 과 동일한 강수패턴을 지닌 한 표본을 무작위로 선정한다. 만약 그러한 표본이 없는 경우에는 단계 1로 돌아간다.

A.2 기온모형

기온모형의 세부내용을 설명한다.

저주파진동 및 강수효과의 모형과 추정

저주파진동과 강수에 의한 기온의 상승 또는 하강효과를 추정하기 위해서 다음과 같은 모형을 고려한다: 주어진 시점 t_0 를 기준으로

$$\begin{aligned} A_i(s,t) &= \beta_{i,0} + \beta_{i,1}(t-t_0) + \beta_{i,2}(t-t_0)^2, \\ \Delta(s,t) &= \Delta(s,t;\mathbf{R}) = \sum_{k=0}^1 \beta_{0,k} \left\{ \sum_{j=1}^d w_j R(s_j, t-k) \right\}^\gamma, \quad w_j = \exp\left\{-\frac{\|s-s_j\|}{\lambda}\right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\mathbf{R} = \{\mathbf{R}(t) : t \in T\}$ 이고 T 는 계절전체기간을 뜻한다. 추정을 위해서 목적함수

$$\ell(\beta, \lambda, \gamma) = \sum_i \sum_t \{T_i(s,t) - E\{T(s,t)\} - A_i(s,t) - \Delta(s,t;\mathbf{R}_i)\}^2 \quad (9)$$

를 최소화시키는 최소제곱법을 고려한다. 여기서, β 는 모형식에 등장하는 모든 회귀계수, $T_i(s,t)$ 와 $\mathbf{R}_i = \{\mathbf{R}_i(t) : t \in T\}$ 는 각각 관측년도 i 의 관측기온과 강수량을 의미하며, i 는 모든 관측년도에서, t 는 $|t-t_0| \leq 15$ 인 범위에서 움직인다.

표준편차모형과 추정

기온의 표준편차도 역시 강수의 영향을 고려한다. 표준편차에 대한 강수효과를 모형식

$$\begin{aligned} \sigma(s,t) &= \sigma(s,t;\mathbf{R}) \\ &= \exp\left\{\frac{1}{2}\left(\beta_{0,0} + \beta_{0,1}(t-t_0) + \beta_{0,2}(t-t_0)^2 + \sum_{k=0}^1 \beta_{1,k} \left\{ \sum_{j=1}^d w_j R(s_j, t-k) \right\}^\gamma\right)\right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

으로 표현하며, (t_0 는 주어진 기준시점), 추정을 위한 목적함수는

$$\ell(\beta, \lambda, \gamma) = \sum_i \sum_t \left\{ \left[\frac{Y_i(s,t)}{\sigma(s,t;\mathbf{R}_i)} \right]^2 + 2 \log \sigma(s,t;\mathbf{R}_i) \right\}, \quad (11)$$

이며 추정량은 이를 최소화시켜 얻는다. 여기서, $Y_i(s,t)$ 은 관측년도 i 의 관측기온에서 앞서 추정된 평년기온, 저주파변동, 강수효과가 제거된 기온편차이고, 그 외 제반사항은 식 (9)와 동일하다.

Anomaly 모형과 생성 알고리즘

비대칭성을 감안하여, $\epsilon(s, t)$ 가 비대칭정규분포(skewed normal distribution)를 따른다고 가정한다. $z(s, t) = \Phi^{-1}(H(\epsilon(s, t)))$ 을 z-score라고 부르기로 하자. 여기서, H 는 $\epsilon(s, t)$ 의 비대칭정규누적분포함수이다. Anomaly의 시공간적 자기상관성을 감안하여 일최고(tmax)/최저(tmin)기온의 z-score 벡터

$$(z^{\text{tmax}}(s_1, t), \dots, z^{\text{tmax}}(s_d, t)), \quad (z^{\text{tmin}}(s_1, t), \dots, z^{\text{tmin}}(s_d, t)) \quad (12)$$

의 첫 번째와 두 번째 주성분은 벡터자기회귀모형을 따르고, (s_1, \dots, s_d) 은 대상지점, 나머지 주성분은 독립이라고 가정한다.

모형추정을 위해서 평년기온, 저주파변동, 강수효과, 표준편차의 추정 후에 식 (1)로부터 관측기간의 anomaly $\epsilon(s, t)$ 의 추정량을 얻고 상기된 모형을 순차적으로 적합시킨다. 단, 비대칭정규분포추정에서는 최대우도법, 벡터자기회귀모형은 Yule-Walker 방법을 쓴다(Lütkepohl(1991)). Anomaly 생성 알고리즘은 다음과 같다.

Anomaly 생성 알고리즘

모의기간이 주어졌다고 하자.

1. 추정된 벡터자기회귀모형으로부터 모의기간 동안의 첫 번째, 두 번째 주성분 시계열을 생성한다.
2. 나머지 주성분을 독립적으로 재추출(re-sampling)기법을 통해 생성한다.
3. 생성된 주성분으로부터 환원해 z-score를 얻는다.
4. $\epsilon(s, t) = H^{-1}(\Phi(z(s, t)))$ 을 통해 anomaly를 얻는다.

【연구자】

김무섭 선임연구원

연구보고서 2017-05

**Weather Generator를 이용한 APCC 계절예측의 통계적 상세화
- 동아시아 겨울/여름몬순 기반으로 -**

I S B N 979-11-5698-195-4

발 행 2018년 3월

발 행 인 정 홍 상

발 행 처 APEC기후센터
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

이 보고서는 APEC기후센터 홈페이지(<http://www.apcc21.org/>)에서 이용하실 수 있습니다.
또한 보고서에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 단, 무단 전재 및
복제를 금합니다.