Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 27, No. 1 (2017) pp. 79-91
https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.1.079
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

우리나라 인근과 유럽의 계절에 따른 강수와 기온의 관계 및 RCP8.5 시나리오에 기반한 미래 전망

김진욱[1)]* · 부경온[1)] · 심성보[1)] · 권원태[2)] · 변영화[1)]
[1)]기상청 국립기상과학원 기후연구과, [2)]제주발전연구원

(접수일: 2016년 11월 14일, 수정일: 2017년 1월 18일, 게재확정일: 2017년 2월 6일)

The Seasonal Correlation Between Temperature and Precipitation Over Korea and Europe and the Future Change From RCP8.5 Scenario

Jin-Uk Kim[1)]*, Kyung-On Boo[1)], Sungbo Shim[1)], Won-Tae Kwon[2)], and Young-Hwa Byun[1)]
[1)]Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea
[2)]Jeju Development Institute, Jeju, Korea

(Manuscript received 14 November 2016; revised 18 January 2017; accepted 6 February 2017)

Abstract It is imperative to understand the characteristics of atmospheric circulation patterns under the climate system due to its impact on climatic factors. Thus this study focused on analyzing the impact of the atmospheric circulation on the relationship between precipitation and temperature regionally. Here we used monthly gridded observational data (i.e., CRU-TS3.2, NOAA-20CR V2c) and HadGEM2-AO climate model by RCP8.5, for the period of 1960~1999 and 2060~2099. The experiment results indicated that the negative relationship was presented over East Asia and Europe during summer. On the other hand, at around Korea (i.e. EA1: 31°N~38°N, 126°E~140°E) and Northwestern Europe (i.e. EU1: 48°N~55°N, 0°E~16°E) in winter, strong positive relationship dominate due to warm moist advection come from ocean related to intensity variation of the East Asian winter monsoon (EAWM) and North Atlantic Oscillation (NAO), respectively. It was found that values of positive relation in EA1 and EU1 at the end of the 21st century is regionally greater than at the end of 20th century during winter since magnitude of variation of the EAWM and NAO is projected to be greater in the future as result of simulation with RCP 8.5. Future summer, the negative correlations are weakened in EA1 region while strengthened in EU1 region. For better understanding of correlations with respect to RCP scenarios, a further study is required.

Key words: Relationship between precipitation and temperature, atmospheric circulation during winter, East Asia, Europe

1. 서 론

산업화 이후 인간 활동에 의해 배출된 온실가스로 인하여 대기 중 온실가스 농도가 급격하게 증가됨에 따라 전지구 평균기온 역시 지난 133년간 약 0.85°C 상승되었다(Hartmann et al., 2013). 기온이 상승함에 따라 대기 중 수증기량과 강수량 역시 열역학적 요인에 의하여 전지구적으로 증가된다(Held and Soden, 2006; Allan et al., 2014). 그러나 강수의 변화는 열역학적 요인과 더불어 역학적인 요인이 복합적으로 작용하기 때문에 불확실성이 매우 크고, 기온의 증가가 단순하게 강수의 증가로 연결된다고 단정지을 수는 없다. 이와 관련하여 Rehfeld and Laepple (2016)은 아

*Corresponding Author: Jin-Uk Kim, Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6668, Fax: +82-64-738-9072
E-mail: jukim86@korea.kr

시아 지역에서 장기적으로 온실가스 배출 증가에 따른 기온상승이 강수량을 증가시키는 양의 관계가 형성되나, 수년-수십년 규모에서는 강수가 기온을 하강시키는 음의 상관관계가 나타난다고 하였다.

강수량과 기온의 관계는 계절에 따라 차이가 있다고 알려져 있으며 이에 대한 연구는 꾸준히 이루어져 왔는데, 그 중에서 Madden and Williams (1978)과 Zhao and Khalil (1993)는 북미 및 유럽지역에 대해서 여름과 겨울의 기온과 강수간의 관계를 분석하였다. 이들은 기온과 강수의 상관관계는 여름에는 대부분의 지역에서 주로 음의 상관성이 나타나는 반면, 겨울에는 음의 상관성이 우세한 지역과 양의 상관성이 뚜렷한 지역으로 나뉜다고 하였다. 이는 계절적인 종관 순환 변화와 관련 있으며 여름에는 유럽 전역에서 강수가 증가(감소)할 때 기온이 하강(상승)하고, 겨울에는 유럽북부에서 강수가 증가할 때 온난해진다(Fleig et al., 2015). Trenberth and Shea (2005)는 전지구에 걸쳐 계절별 기온과 강수의 관계를 분석하였다. 그의 연구에 따르면 여름에 전지구적으로 일사량이 증가하고 증발에 의한 냉각이 감소하면 건조해지며, 습윤한 경우에는 비교적 기온이 감소하므로 기온과 강수 사이에 음의 상관관계가 성립된다고 하였다. 반면에 겨울에는 일부 고위도 지역에서 온대저기압에 의해 해양의 온난한 수분이 대륙으로 이류되면 기온이 상승하고, 반대로 기온이 낮을 때는 대기의 수증기 수용력이 제한되어 강수량이 감소하므로 기온과 강수 사이에 양의 상관관계가 형성된다고 밝혔다. Lehmann and Coumou (2015)는 북반구 중 · 고위도의 스톰트랙과 기온, 강수의 관계분석을 통해 겨울에 유럽과 동아시아 등 여러 지역에서 스톰트랙이 약화되면 기온이 하강하고 강수가 감소하므로 기온과 강수 사이에 양의 상관관계가 형성될 수 있다고 하였다.

이로부터 대기순환 변동에 따라 경년변동이 달라지고 계절별로 반응이 다른 강수와 기온의 상관관계를 살펴보는 것은 지역 기후시스템에 대한 이해를 넓히는데 매우 중요함을 알 수 있다. 이 연구에서는 선행연구에서 알려진 강수량과 기온의 계절별 상관관계를 강수량이 많고 적은 다우해와 과우해의 기온비교를 통해 확인하였다. 그리고 기존 연구들을 통해 겨울에 기온과 강수 사이에 양의 상관관계가 나타난다고 알려진 동아시아와 유럽지역에 대하여 20세기 말에 이러한 관계를 유발하는 대기순환의 특성을 비교하였다. 또한 이러한 기온과 강수 사이의 관계가 21세기 말에는 어떻게 변화하는지 전망하고자 한다.

20세기 말 분석을 위해 재분석자료를 사용하였고 21세기 말 변화는 RCP8.5 시나리오에 따른 HadGEM2-AO의 적분결과를 분석하였다. 이 논문의 2장에서는 사용한 자료와 분석방법에 대해 설명하였고 3장에서는 관측자료와 기후모델자료를 사용하여 과거와 미래에 대하여 강수변동성에 따른 기온과 대기순환의 특성을 분석한 연구결과를 기술하였으며, 4장에서는 요약 및 결론을 기술하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 관측자료

이 연구에서는 기온과 강수의 관계를 분석하기 위해 CRU-TS (Climatic Research Unit-Time-series) 3.2의 월평균 기온과 강수량 자료를 사용하였다. CRU-TS3.2의 수평해상도는 0.5°(경도) × 0.5°(위도)(720 × 360 격자)이다. 분석에 사용된 자료의 기간은 1960년부터 1999년까지 총 40년이며, 여름(6월~8월)과 겨울(12월~2월)의 자료를 사용하였다. 겨울은 해당되는 해의 12월과 이듬해의 1월, 2월로 정의하였으며, 1999년의 겨울은 1999년 12월과 2000년 1월, 2월의 자료를 평균하여 사용하였다.

강수 및 기온의 변동성과 관련된 대기순환 패턴의 분석은 NOAA-20CR (National Oceanic and Atmospheric Administration - Twentieth Century Reanalysis) V2c 자료를 사용하였다. NOAA-20CR V2c의 수평해상도는 2.0°(경도) × 2.0°(위도)(180 × 91격자)로, CRU-TS3.2보다 비교적 저해상도이다. 자료의 사용기간은 CRU-TS3.2와 동일하게 1960년부터 1999년까지 총 40년이다. 분석에 사용된 변수는 월평균 해면기압, 300 hPa 동서방향 바람, 850 hPa 동서방향 바람과 남북방향 바람 및 비습이다.

2.2 기후모델(HadGEM2-AO)

기후변화에 따른 미래 기후특성을 분석하기 위하여 전지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO (Hadley Centre Global Environment Model version 2 - Atmosphere Ocean; Collins et al., 2008)를 사용하였다. 과거기후 모의실험(Historical) 자료의 사용기간은 CRU-TS3.2 및 NOAA-20CR V2c 자료와 동일한 1960년부터 1999년까지 총 40년이다. 미래기후변화 전망자료의 사용기간은 2060년부터 2099년까지 총 40년이며, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 평가보고서(the 5th Assessment Report: AR5)에서 채택된 4개의 온실가스배출 시나리오 중 기후변화가 가장 극단적으로 진행될 것으로 모의하는 RCP (Representative Concentration Pathway) 8.5 시나리오를 사용하였다. HadGEM2-AO의 수평해상도는 1.875° (경도) × 1.25°(위도)(192 × 145격자)이다. 분석에 사용된 변수는 월평균 기온, 월평균 강수량, 해면기압, 300 hPa 동서방향 바람, 850 hPa 동서방향 바람과 남북방향 바람 및 비습이다. 이 연구에서는 HadGEM2-AO

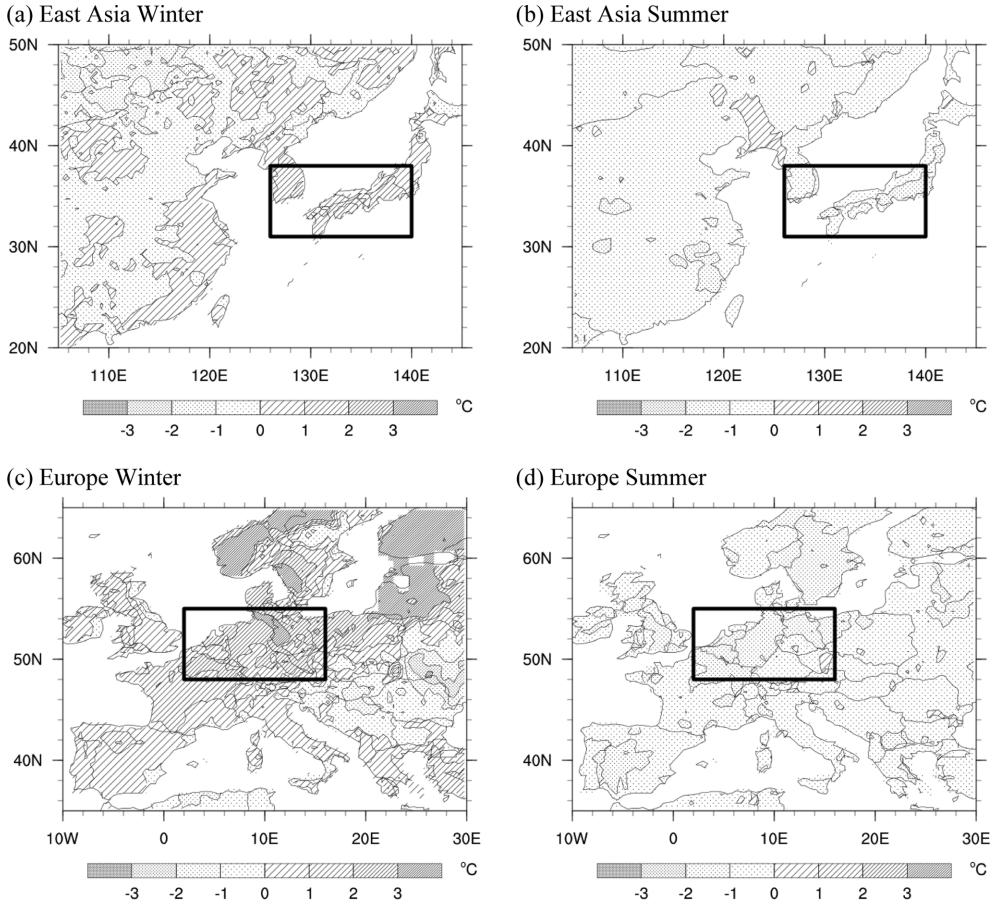

Fig. 1. Temperature difference (wet year - dry year) in (left) winter and (right) summer over (top) East Asia and (bottom) Europe.

한 가지 모델만을 사용함에 따라 자료에 불확실성이 존재할 것으로 생각된다. 그러나 Yoon et al. (2015)에 따르면 HadGEM2-AO는 CMIP5 11개 모델 중에서 이 연구에서 중점적으로 살펴본 동아시아 겨울 기온과 강수에 큰 영향을 미치는 동아시아 겨울몬순, 스톰트랙 등에 대해서 가장 높은 모의 성능을 보인다. 또한 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Re-Analysis Interim (ERA-Interim)과 비교하였을 때, 동아시아 겨울몬순의 변동과 관련된 상층 제트, 시베리아고기압 및 알류샨저기압 등의 변동을 비교적 잘 나타낸다. 이러한 연구결과는 HadGEM2-AO 단일모델을 사용함에 따른 불확실성이 크지 않다는 것을 입증한다.

2.3 분석방법

강수량의 변동성과 관련된 기온의 변동 및 대기순환 패턴을 분석하기 위해 동아시아와 유럽에서 총 40년의 분석기간 중 강수량이 많은 해를 다우해(wet year), 적은 해를 과우해(dry year)로 각각 정의하였다. 다우해와 과우해를 구분하는 상세한 방법은 다음과 같다.

1) 사용 자료의 각 격자에 대해서 강수량이 많은 10년(상위 25%)을 다우해, 적은 10년(하위 25%)을 과우해로 구분

2) 겨울에 평년에 비해 다우해에 기온이 높고 과우해에 기온이 낮은 격자가 밀집된 지역을 '상세분석지역'으로 지정

3) 상세분석지역의 강수량을 영역 평균한 후, 이를 기준으로 다시 다우해 및 과우해를 각각 설정 (강수량이 많은 10년은 다우해, 적은 10년은 과우해)

다우해와 과우해는 각 계절에 대해서 개별적으로 적용하였다. 다우해의 기온에서 과우해의 기온을 뺀 기온편차가 음의 값이면 기온과 강수 사이에 음의 상관관계가 형성되고, 반대로 양의 값이면 양의 상관관계가 형성된다고 볼 수 있다. 이 연구에서는 편의상

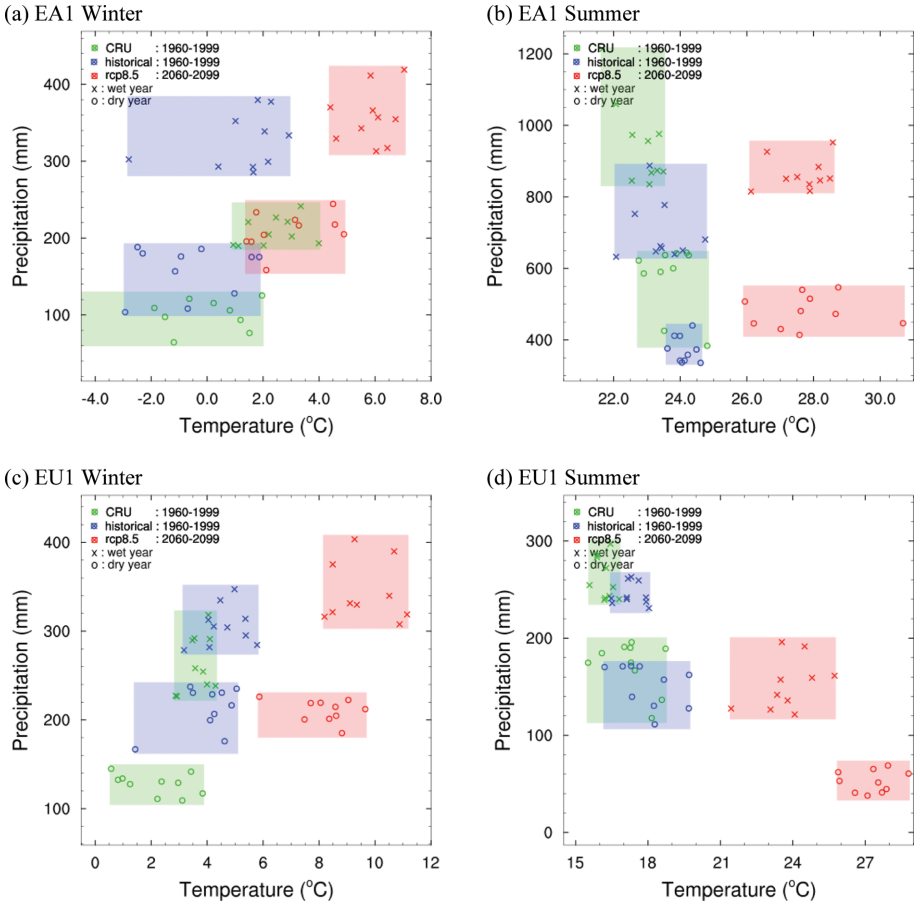

Fig. 2. Scatter diagrams of temperature and precipitation in (left) winter and (right) summer over the (top) EA1 (31°N~38°N, 126°E~140°E) region and the (bottom) EU1 (48°N~55°N, 2°E~16°E) region. X: wet year, O: dry year, green box: CRU-TS3.2, blue box: HadGEM2-AO (historical), red box: HadGEM2-AO (RCP8.5).

'기온편차'를 '다우해의 기온에서 과우해의 기온을 뺀 기온편차'라고 정의하였다. 또한 Trenberth and Shea (2005)에서 사용한 것과 같이 여름과 겨울에 대해 강수량과 기온 사이의 상관계수 계산을 통해 상관관계를 추가적으로 살펴보았으며, 유의수준 0.05를 기준으로 유의성을 평가하였다. 그리고 기온과 강수 사이에 양의 상관관계가 나타나는 지역을 기준으로 다우해와 과우해의 대기순환의 패턴을 비교하여 강수량의 변동에 따른 기후시스템의 특성을 분석하였다.

동아시아와 유럽에서 겨울에 강수와 기온간의 양의 상관관계가 뚜렷한 지역을 찾기 위하여 Fig. 1에 CRU 자료를 사용하여 기온편차를 나타내었다. 빗금이 쳐진 지역은 양의 상관이 나타나는 지역이며, 빗금의 간격이 좁을수록 양의 상관성이 뚜렷하다. 검정색 사각형에 포함되는 영역은 비교적 양의 상관성이 뚜렷한 지역으로, 동아시아와 유럽에서 이들 지역을 각각 EA1 (31°N~38°N, 126°E~140°E)과 EU1 (48°N~55°N, 0°E~16°E)이라고 명명하였다. EA1은 우리나라와 일본이 포함된 지역이고 EU1은 프랑스북동부, 벨기에, 네덜란드, 독일, 체코 등이 포함된 지역이다. 이 연구에서는 EA1과 EU1을 상세분석지역으로 구분하고, 이들 지역에서 영역 평균된 강수량과 기온을 기준 분석을 수행하였다.

3. 연구결과

3.1 기온과 강수의 상관관계

이 절에서는 과거 40년(1960~1999) 동안 우리나라를 비롯한 동아시아와 유럽지역에 대하여 여름(6월~8월) 및 겨울(12월~2월)의 다우해와 과우해의 기온과 강수량의 차이를 나타내었다. Figure 1은 CRU-TS3.2 자료를 사용하여 각 격자에 대한 기온편차를 나타낸

Table 1. Difference of temperature and precipitation (wet year - dry year) and correlation between temperature and precipitation from CRU-TS3.2.

Region	Location	Winter			Summer		
		Temp. (°C)	Prec. (mm)	Corr.	Temp. (°C)	Prec. (mm)	Corr.
EA1	31°N~38°N, 126°E~140°E	1.5	135.8	0.55*	−0.9	370.2	−0.59*
EU1	48°N~55°N, 2°E~16°E	2.8	106.9	0.47*	−1.1	88.8	−0.52*

*Significant at 95% level.

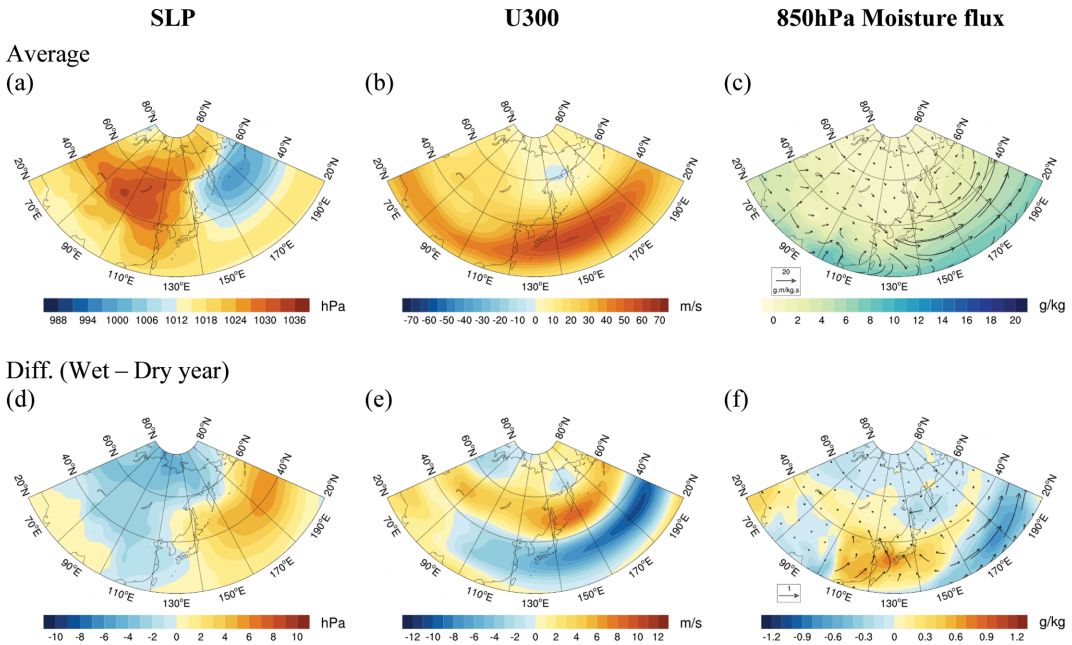

Fig. 3. The spatial distribution of (left) sea level pressure, (center) 300 hPa zonal wind, (right) 850 hPa specific humidity & 850 hPa horizontal wind during the winter over East Asia from NOAA 20CR V2c. (top) The climatological mean fields, (bottom) difference maps between wet year and dry year.

그림이다. 그림의 좌측은 겨울, 우측은 여름이고 상단은 동아시아지역, 하단은 유럽지역이다. 북반구 여름에는 동아시아와 유럽 대부분의 지역에서 다우해와 과우해 사이에 음의 기온편차가 있으므로 기온과 강수 사이에는 음의 상관관계가 있다고 할 수 있다(Figs. 1b, d). 그러나 겨울에는 Trenberth and Shea (2005)에서 밝힌 바와 같이 일부 지역에서 양의 상관관계가 나타난다. 동아시아에서는 몽골지역을 중심으로 한 내륙은 음의 기온편차가 우세하지만 북서태평양에 인접한 우리나라와 일본을 중심으로 양의 기온편차가 나타난다(Fig. 1a). 유럽에서는 남동부 일부 지역을 제외하고 대부분의 지역에서 양의 기온편차가 뚜렷하다(Fig. 1c). 따라서 이 연구에서는 겨울에 강수와 기온간에 양의 상관관계가 뚜렷한 EA1과 EU1 지역에 대해서 기온과 강수특성을 자세하게 살펴보았다.

다우해와 과우해의 기온과 강수량의 관계는 Fig. 2의 분포에서도 확인할 수 있다. EA1(상단)과 EU1(하단) 지역에 대해 좌측은 겨울, 우측은 여름에 해당되며, 다우해는 ×, 과우해는 ○로 표시하였다. 녹색영역은 관측자료, 파란색은 기후모델의 과거기후 모의실험(1960~1999), 붉은색은 미래기후변화 전망(2060~2099)자료이다. 관측자료에서는 EA1 지역에서 겨울 기온편차는 +1.5°C로 양의 편차가 나타났고, 여름의 기온편차는 −0.9°C로 음의 편차가 나타났다(Figs. 2a, b와 Table 1). 또한 기온과 강수 사이의 상관계수는 겨울에 +0.55로 양의 상관관계가 뚜렷하고 여름에는 −0.59로 음의 상관관계가 매우 뚜렷하다(Table 1). EU1 지역의 겨울 기온편차는 +2.8°C, 여름 기온편차는 −1.1°C로 각각 양의 편차와 음의 편차가 나타났다(Figs. 2c, d와 Table 1). 기온과 강수간의 상관계수는 겨울

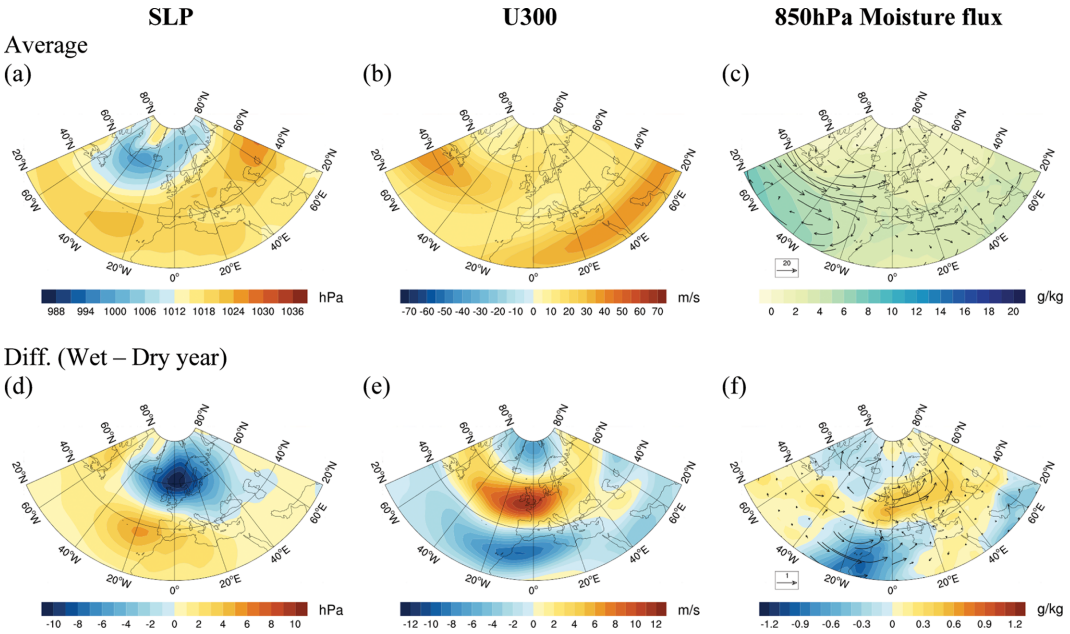

Fig. 4. The same as in Fig. 3, but over Europe.

에 +0.47로 양의 상관관계가 나타나고 여름에 –0.52로 음의 상관관계가 나타났다.

3.2 다우해와 과우해의 대기순환 특성

이 절에서는 겨울에 EA1과 EU1 지역에서 다우해에 강수량이 증가할 때 기온의 상승을 유발하는 기후시스템을 조사하여 강수와 기온 사이에 양의 상관관계가 나타나는 메커니즘을 살펴보았다. 이를 위해서 NOAA-20CR 자료를 기반으로 동아시아와 유럽에 대한 다우해와 과우해의 대기순환 패턴을 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Figures 3과 4에서 좌측은 해면기압, 중앙은 상층 동서방향 바람, 우측은 대기 하층(850 hPa)의 수증기량과 수분속(moisture flux)이며, 그림의 상단은 평균적인 대기순환 패턴이고 하단은 다우해와 과우해의 대기순환 패턴을 비교한 것이다.

동아시아는 기후학적으로 겨울에 시베리아에서 고기압성순환이 강해지는 것과 동시에 알류샨열도 부근에서는 저기압성순환이 강해지고(Fig. 3a) 두 기압대 사이의 북풍이 강화됨에 따라 대륙의 차갑고 건조한 공기가 동아시아로 유입되는(Fig. 3c), 동아시아 겨울몬순(EAWM: East Asian Winter Monsoon)의 영향을 받는다. 강수량이 많은 다우해는 과우해에 비해 시베리아고기압과 알류샨저기압의 세력이 약화되어 대륙으로부터의 북풍이 약해지고 아열대 제트의 강도도 약화된다(Figs. 3d, e). 이는 동아시아 겨울몬순이 약화되는 전형적인 패턴이다(Jhun and Lee, 2004). Lee et al. (2010)에 의하면 동아시아 겨울몬순이 약해지면 북태평양 스톰트랙의 중심부가 위치하는 고위도 지역(45°N 이북)의 서풍 아노말리가 강화되고 종관 에디 활동이 강해됨에 따라 우리나라와 일본을 포함한 북서태평양지역의 대기하층 기온이 상승하고 강수가 증가하므로, 기온은 강수와 양의 상관관계를 갖게 된다. 다우해와 과우해의 대기순환 패턴에서 EA1 지역의 겨울 기온과 강수의 변동성이 동아시아 겨울몬순과 관련이 있음을 확인하였으므로, 이들의 상관관계를 정량적으로 조사하였다. 동아시아 겨울몬순의 강도는 Jhun and Lee (2004)에서 27.5°N~37.5°N, 110°E~170°E 지역과 50°N~60°N, 80°E~140°E 지역의 300 hPa 동서바람의 편차를 통해 정의한 East Asian Winter Monsoon Index (EAWMI) 지수를 사용하여 나타내었다. 겨울에 EA1지역의 기온 및 강수와 EAWMI의 상관계수는 각각 –0.80, –0.64로 음의 상관관계가 뚜렷하게 나타났다(Figs. 5a, b). 즉, 북서풍을 강화시키는 동아시아 겨울몬순이 약화되어 대기 하층 남풍아노말리가 강해지면 저위도 해양의 수분이 우리나라 남부, 동중국해와 일본 큐슈지방으로 북상한다(Fig. 3f). 상대적으로 온난한 저위도 해양의 수분이 공급되면 EA1 지역은 온난 다습한 상태가 되므로 다우해에 기온이 높아진다. 반대로 동아시아 겨울몬순이 강화되는 과우해에는 북서풍이 강화되어 EA1 지역은 한랭 건조한 상태가 된다.

겨울에 북대서양에는 일반적으로 아이슬란드 부근에 저기압성순환이 자리하고 아조레스제도에는 고기

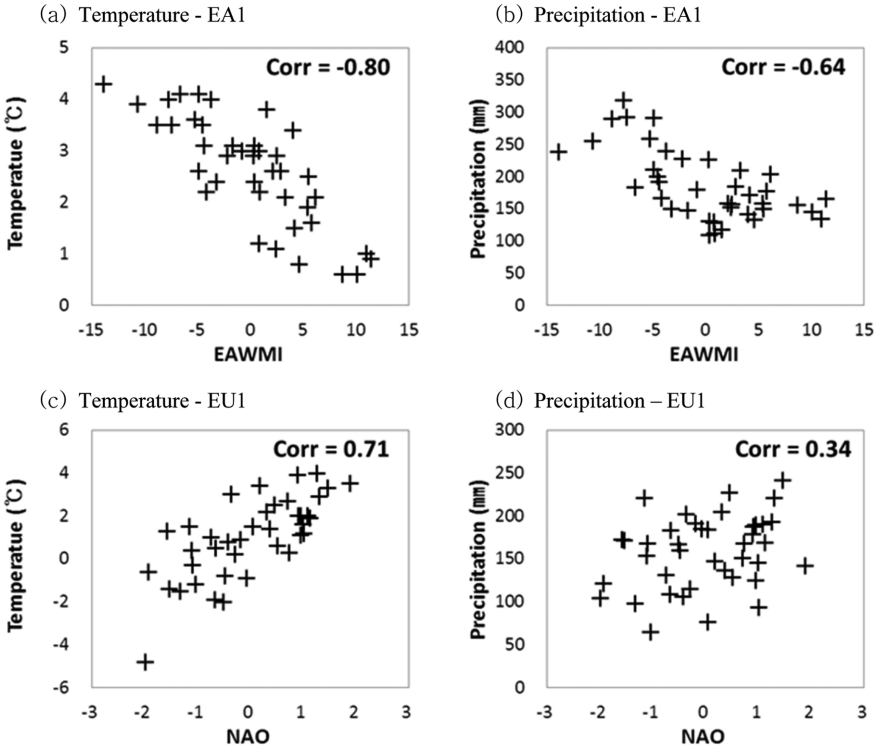

Fig. 5. Scatter diagrams: (top) East Asian Winter Monsoon Index and (a) temperature and (b) precipitation over the EA1 (31°N~38°N, 126°E~140°E) region; (bottom) North Atlantic Oscillation Index and (c) temperature and (d) precipitation over the EU1 (48°N~55°N, 2°E~16°E).

압성순환이 자리한다(Fig. 4a). 북쪽과 남쪽에 각각 저기압과 고기압이 자리함에 따라 두 기압대 사이의 하층바람은 서풍이 지배적이며 상층에도 제트기류로 인하여 서풍이 강하게 불기 때문에 유럽대륙은 북대서양으로부터 수송된 수분의 영향을 받는다(Figs. 4b, c). 다우해는 과우해보다 북대서양 북쪽의 아이슬란드저기압이 강화되면서 남동쪽으로 확장하고 아조레스고기압이 강화됨에 따라 두 기압대 사이에서 대기 하층과 상층의 서풍이 강화된다(Figs. 4d, e, f). 상대적으로 북대서양에서 유럽대륙으로 흐르는 수분이류가 증가하여 EU1 지역은 수분이 많아지고 기온이 상승된다. 이러한 다우해의 대기순환 패턴은 유럽의 겨울기후에 전반적으로 영향을 미치는 North Atlantic Oscillation (NAO)가 양의 값(positive)을 갖는 경우와 유사하다. 겨울에 NAO가 양의 값을 가질 때 아조레스고기압이 강화되어 상층제트와 스톰트랙을 북상시키면 유럽북부에는 많은 강수가 내리고 기온이 상승되며, 고기압이 자리잡은 지중해 부근은 평년보다 강수가 감소, 기온이 하강된다(Lehmann and Coumou, 2015). 과우해에는 NAO가 음의 값인 경우와 비슷한 대기패턴이 나타나서, 대기 상층과 하층의 서풍이 약해지며 유럽북부의 강수가 감소되고 기온이 하강된다. Figure 4를 통해서 EU1지역의 기온, 강수의 변동성은 NAO의 변동과 관련이 있음을 확인하였으므로 이들의 상관관계를 정량적으로 분석하였다. NAO의 강도는 Hurrell (1995)과 Jhun and Lee (2004)에서 제시한 방법인 북대서양 북부(65°N, 20°W)와 남부(40°N, 10°W)의 해면기압 차이로 정의하였다. 겨울에 NAO와 EU1 지역의 기온 및 강수의 상관계수는 각각 0.71, 0.34로 유의한 양의 상관성이 나타났다(Figs. 5c, d). 이로 인하여 겨울에 NAO가 양(음)의 값을 가지면 북대서양으로부터의 수분이류가 증가(감소)하여 EU1지역은 온난다습(한랭건조)한 상태가 되며, 이러한 특성은 기온과 강수 사이에 양의 상관관계를 유발한다.

3.3 HadGEM2-AO의 특성과 미래 변화 전망

이 절에서는 HadGEM2-AO의 과거기후 모의실험자료를 사용하여 EA1과 EU1 지역에서 다우해와 과우해의 비교를 통해 기후모델이 기온과 강수의 관계를 어떻게 모의하고 있는지 살펴보았다. 또한 RCP8.5 시나리오 기반의 미래기후변화 전망자료를 사용하여 21세기 말의 기온과 강수 사이의 관계 변화 및 이와 관

Table 2. Difference of temperature and precipitation (wet year - dry year) and correlation between temperature and precipitation from HadGEM2-AO.

Region	Period	Winter			Summer		
		Temp. (°C)	Prec. (mm)	Corr.	Temp. (°C)	Prec. (mm)	Corr.
EA1	1960~1999	0.6	92.9	0.34*	−0.7	325.8	−0.38*
	2060~2099	1.4	132.8	0.39*	−0.1	383.2	−0.06
EU1	1960~1999	1.9	167.7	0.35*	−0.7	94.1	−0.40*
	2060~2099	3.0	148.6	0.60*	−3.5	99.2	−0.67*

*Significant at 95% level.

련된 대기순환의 변화를 조사하였다.

HadGEM2-AO의 과거기후 모의실험에 따르면 EA1 지역에서 겨울 기온편차는 +0.6°C, 기온과 강수의 상관계수는 +0.34로 양의 상관관계가 나타나고 여름 기온편차는 –0.7°C, 상관계수는 -0.38로 음의 상관관계가 나타났다(Fig. 2와 Table 2). 겨울에 양의 상관관계, 여름에 음의 상관관계가 나타나는 것은 관측자료와 같았으나, 두 기후요소간의 상관성은 비교적 낮다. 미래기후변화 전망에서는 EA1지역에서 겨울 기온편차가 +1.4°C, 기온과 강수의 상관계수는 +0.39로 기온과 강수의 상관성이 과거에 비해 강화된다. 반면에 여름은 기온편차가 –0.1°C, 상관계수는 –0.06으로 기온과 강수의 상관성이 과거보다 약화되어 뚜렷한 상관성은 없을 것으로 전망된다(Table 2). 이는 아시아 지역에서 수년-수십년 규모에서는 강수가 기온을 하강시키는 관계가 우세하지만, 미래에는 온실가스 배출에 따른 기온상승이 강수량을 증가시키는 작용을 한다고 밝힌 Rehfeld and Laepple (2016)을 통해 설명할 수 있다. 미래 동아시아에서 여름 강수는 열역학적 요인의 영향을 많이 받을 것으로 전망된다는 Endo and Kitoh (2014)의 연구 결과는 이를 뒷받침 한다. 즉, 과거에는 강수가 기온의 하강을 이끄는 경향이 강하지만, 반대로 미래에는 기온 상승이 강수의 증가를 이끄는 경향이 강해질 것으로 전망되기 때문에 EA1 지역에서 여름 강수와 기온간의 음의 관계가 약화된다고 볼 수 있다.

HadGEM2-AO에 의한 과거 동아시아의 겨울 대기순환 패턴은 관측자료에 비해 상층제트의 강도를 약간 과대 모의하고 시베리아고기압과 알류샨저기압의 중심위치가 조금 서쪽으로 치우쳐 있으나 전체적으로 유사하게 모의하였다(Figs. 6a, b, c). 강수변동성에 따른 대기순환 패턴의 변화는 관측에서 나타난 동아시아 겨울몬순의 변동을 뚜렷하게 나타내지 못하였다. 다우해는 과우해에 비해 알류샨저기압이 오히려 조금 강화되고 시베리아고기압은 큰 차이가 없으며, EAWMI의 기준이 되는 두 지역의 상층 동서방향바람도 뚜렷한 차이를 보이지 않는다(Figs. 6d, e, f). RCP8.5 시나리오를 기반으로 한 21세기 말에는 다우해에 알류샨저기압이 다소 약화(고기압성순환 강화)되지만 시베리아고기압은 뚜렷한 변화가 없다(Fig. 6j). 다우해에 알류샨저기압의 약화로 인해 동서간 기압경도가 감소하고 과우해에 비해 EAWMI가 약 4.8 낮으므로 동아시아 겨울몬순은 약화된다고 볼 수 있다. 따라서 관측자료와 마찬가지로 동아시아 주변에서 남풍이 강해지고 북서태평양에서 동아시아로 유입되는 수분이류가 증가한다(Fig. 6l). 즉, 미래에도 겨울 동아시아 기온과 강수의 변동성은 조금 변형된 동아시아 겨울몬순과 관련이 있다고 할 수 있다.

EA1 지역의 기온 및 강수의 변동성과 동아시아 겨울몬순의 관계를 정량적으로 살펴보면, 기온과 동아시아 겨울몬순의 상관관계는 과거와 미래 모두 –0.61로 뚜렷한 음의 상관성이 나타났다(Fig. 7). 강수와 동아시아 겨울몬순의 상관계수는 과거와 미래에 각각 –0.17, –0.29로 유의성은 낮지만 음의 상관성이 나타났으며, 과거에 비해 미래에 동아시아 겨울몬순과 강수변동성 사이의 상관성이 더 높을 것으로 전망된다. 이는 과거에는 다우해에 북서태평양의 수증기가 EA1 남부를 지나 북서진 하여 중국으로 수송되지만 미래에는 북서태평양의 수증기가 직접적으로 EA1로 수송되는 것과 관련된 것으로 보인다(Figs. 6f, l). 미래에는 과거에 비해 전체적으로 EAWMI가 약 0.4 감소하고 다우해는 2.2 감소, 과우해는 1.9 증가하여 미래에 다우해와 과우해 사이에 동아시아 겨울몬순의 변동성이 증가할 것으로 전망된다.

EU1 지역은 과거기후 모의실험기간에는 겨울 기온편차가 +1.9°C, 기온과 강수의 상관계수는 +0.35로 양의 상관관계가 나타나고 여름에는 기온편차가 –0.7°C, 상관계수는 –0.40으로 음의 상관관계가 나타난다(Fig. 2와 Table 2). 겨울과 여름 모두 기온-강수간의 상관관계는 관측자료에 비해 낮다. RCP8.5 기반의 미래기후변화 전망에서는 21세기 말 겨울에 기온이 상승함에 따라 강수량이 증가(+19.1%)하여 기온과 강수의 상관계수가 +0.60으로, 양의 상관관계가 과거보다 뚜렷하게 강화될 것으로 예상된다. 여름에는 EU1 지역

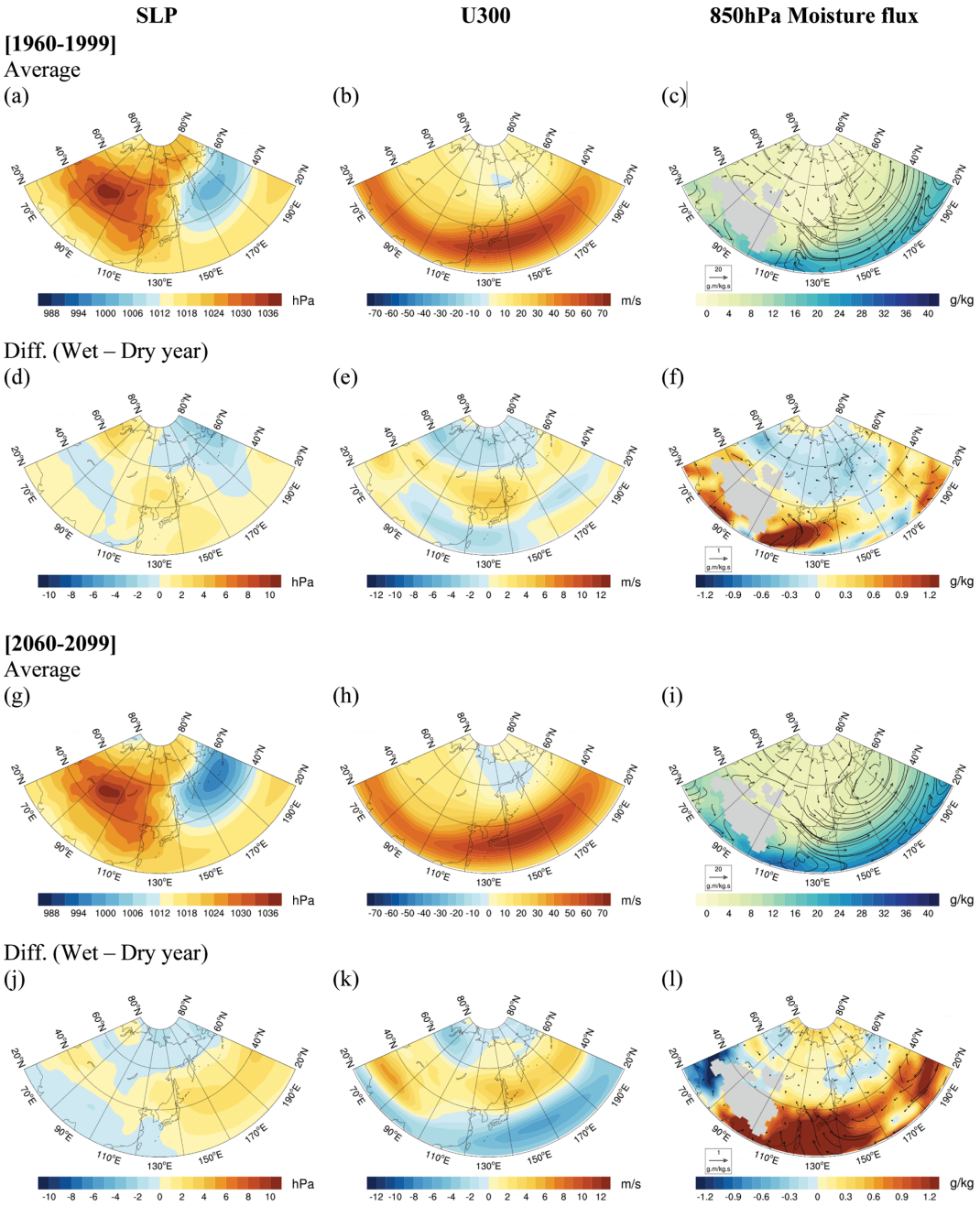

Fig. 6. The spatial distribution of (left) sea level pressure, (center) 300 hPa zonal wind, (right) 850 hPa specific humidity & 850 hPa horizontal wind during the winter over East Asia from HadGEM2-AO. (first and third rows) The climatological mean fields, (second and fourth rows) difference maps between wet year and dry year.

의 기온은 상승하지만 강수량은 SNAO (Summer North Atlantic Oscillation)가 양의 값을 갖는 빈도가 늘어남에 따라 감소(–51.3%) 한다(Folland et al., 2008; Lehmann and Coumou, 2015). 따라서 미래 여름에 EU1 지역은 건조화 되고 기온과 강수 사이에 상관계수는 –0.67로 과거에 비해 음의 상관관계가 더욱 강화될 것으로 전망된다.

HadGEM2-AO에 기반한 과거 겨울의 EU1 지역의

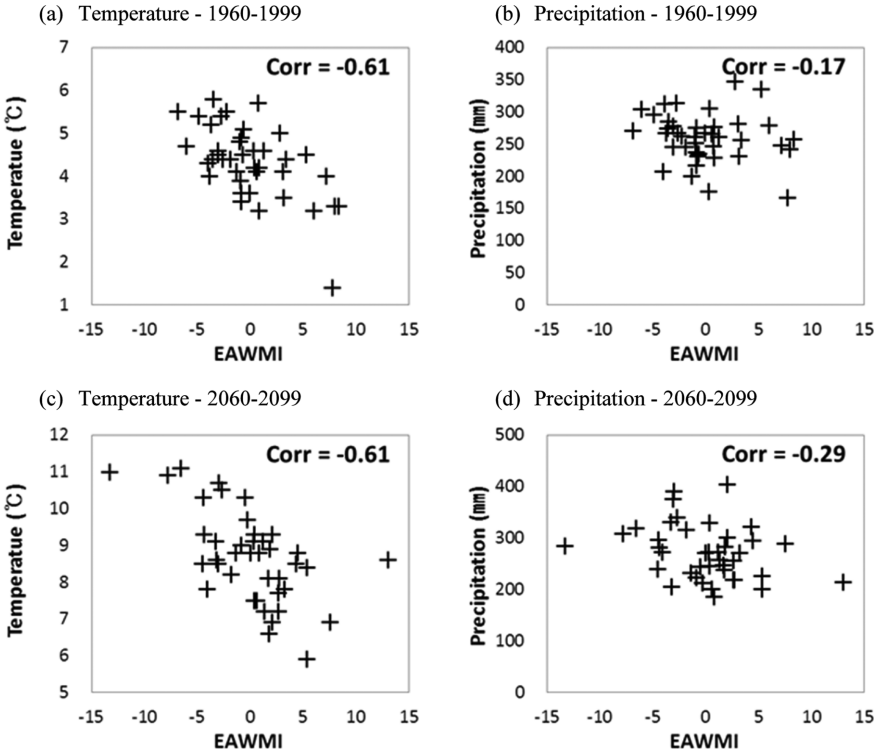

Fig. 7. Scatter diagrams of East Asian Winter Monsoon Index and (left) temperature and (right) precipitation over the EA1 (31°N~38°N, 126°E~140°E) region over the periods (top) 1960~1999, (bottom) 2060~2099.

강수변동성에 따른 대기순환 패턴에서 관측자료와 마찬가지로 NAO의 강도변화와 유사한 패턴을 확인하였다. 그러나 관측에 비해 다우해에 아이슬란드저기압이 강화되는 중심위치는 동쪽, 아조레스고기압이 강화되는 중심위치는 북서쪽으로 이동하여 두 기압대가 남-북으로 대치하지 않고 동-서 방향으로 대치하는 형태가 나타난다. 그에 따라 북대서양-EU1 지역간의 서풍에 의한 수증기 이류가 관측에 비해 감소하는 것으로 모의하고 있다(Figs. 8d, f). 미래에는 과거에 비해 다우해에 북대서양에서 남-북간의 해면기압 경도가 커지고 대기 상 · 하층의 서풍 강화가 뚜렷하여 북대서양에서 EU1로 향하는 온난한 수증기이류가 증가한다(Figs. 8j, k, l). 이는 NAO가 양의 값일 때와 유사한 대기순환 패턴으로, EU1의 기온과 강수가 증가하고 두 기후요소간에는 양의 상관관계가 형성된다. 미래에는 과거에 비해 다우해에 북대서양 남북간의 기압차, 북대서양에서 EU1로 향하는 수분이류, 상층제트 강화 등 모든 부분에서 NAO가 양의 값을 갖는 패턴과 유사하게 모의하고 있다. EU1지역에서 과거와 미래의 기온 및 강수의 변동성과 NAO의 상관관계를 정량적으로 살펴보면, 기온과 NAO간의 상관계수는 과거에는 +0.59, 미래에는 +0.61로 양의 상관성이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 9). 강수와 NAO의 상관계수는 과거에는 +0.07로 상관성이 매우 작았으나 미래에는 +0.39로 양의 상관성이 유의하게 나타났다. 따라서 EU1 지역의 겨울 기온과 강수의 변동성에 미치는 NAO의 영향은 과거보다 미래에 더 커질 것으로 전망된다. 미래에는 과거에 비해 NAO와 관련된 북대서양 두 지역의 해면기압차이가 다우해는 4.0 증가, 과우해는 1.3 감소하여 과거보다 미래에 다우해와 과우해 사이에 NAO의 변동성이 증가할 것으로 전망된다.

4. 요약 및 결론

지구온난화에 따라 전지구 평균 강수량은 증가하나, 강수의 변화는 열역학적 요인과 더불어 역학적 요인이 복잡하게 작용하므로 지역적으로 계절별 변화를 이해할 필요가 있다. 이에 기온과 강수량의 관계에 대한 선행연구를 바탕으로 다우해와 과우해를 비교하여 기존에 알려진 계절별 관계를 확인하고 이 관계의 미래 변화를 전망하였다. 관측자료(CRU-TS3.2와 NOAA-20CR V2c)를 사용하여 과거 40년(1960~1999) 동안

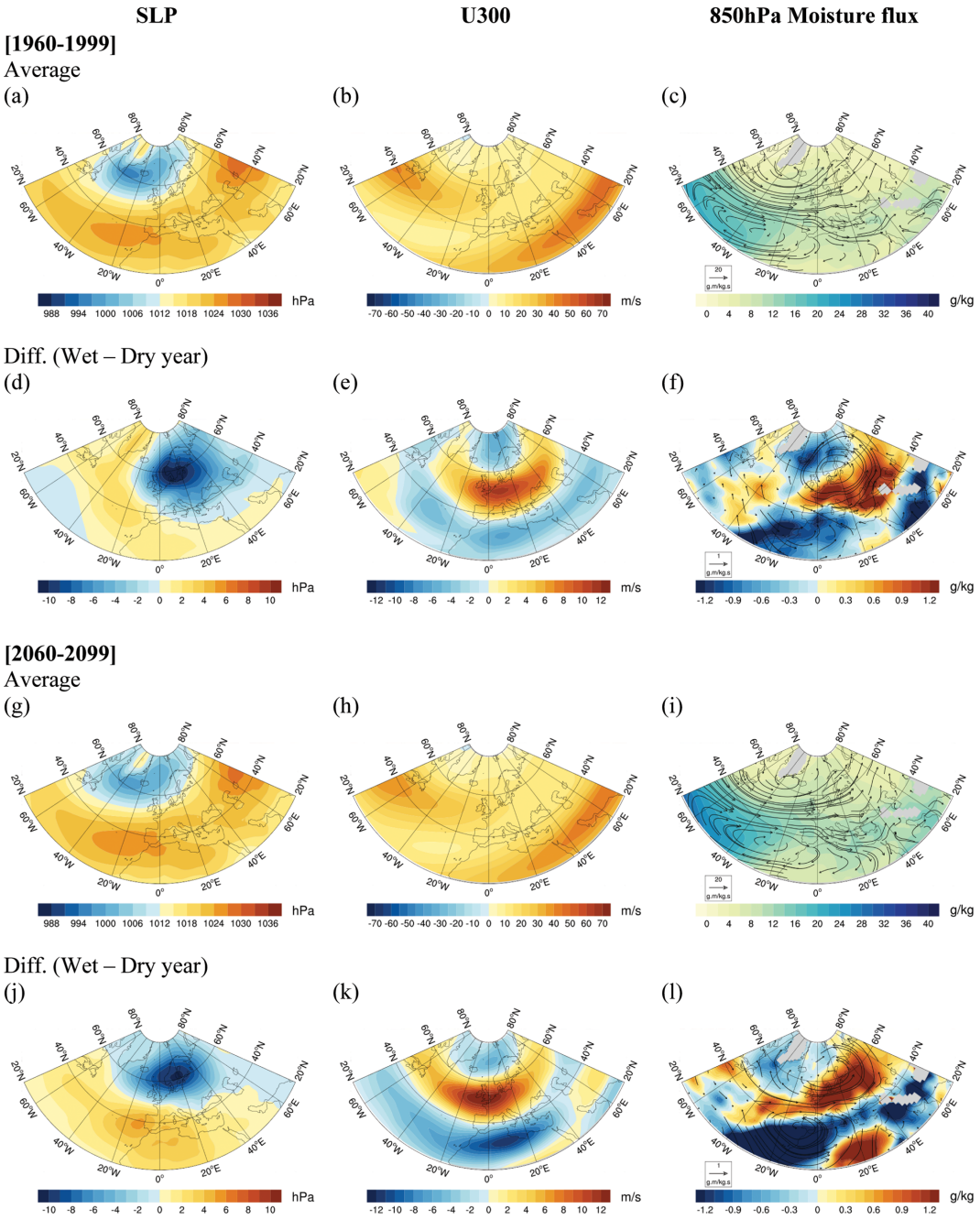

Fig. 8. The same as in Fig. 6, but over Europe.

우리나라 인근(EA1: 31°N~38°N, 126°E~140°E)과 유럽 북부(EU1: 48°N~55°N, 0°E~16°E)에 대해서 분석하였다. 또한 기후모델(HadGEM2-AO)을 사용하여 과거(1960~1999)와 RCP8.5 시나리오에 기반한 미래(2060~2099)의 강수 및 기온 변동에 따른 대기순환의 변화를 분석하였다. 다우해와 과우해의 기온 및 대기순환을 비교하여 선행연구에서 알려진 기온과 강수의 상관관계를 이해하고자 하였다.

관측자료에서는 EA1에서 기온과 강수의 상관관계는 여름에는 음의 상관관계가 뚜렷한 반면 겨울에는

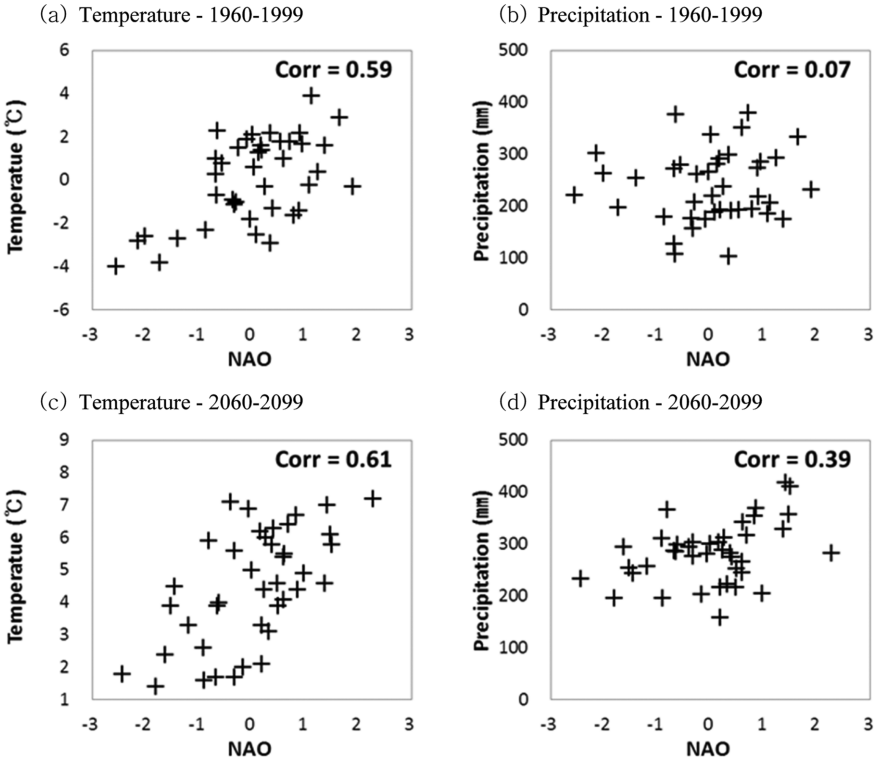

Fig. 9. Scatter diagrams of North Atlantic Oscillation Index and (left) temperature and (right) precipitation over the EU1 (48^{o}N~55^{o}N, 2^{o}E~16^{o}E) region over the periods (top) 1960~1999, (bottom) 2060~2099.

양의 상관관계가 나타난다. EA1 지역에서 겨울에 기온 및 강수량은 동아시아 겨울몬순과 음의 상관관계가 뚜렷하며, 다우해에 동아시아 겨울몬순 약화와 유사한 대기순환 패턴이 나타난다. 다우해에 대기 하층의 남풍아노말리가 강해지면 EA1 지역은 저위도 해양의 수분을 공급받아서 온난 다습해진다. 동아시아 겨울몬순이 약(강)해지면 EA1의 기온과 강수는 증가(감소)되므로 동아시아 겨울몬순의 변동이 겨울 기온과 강수간에 양의 상관관계를 유발한다고 볼 수 있다. EU1에서 기온과 강수의 상관관계는 여름에는 음의 상관관계가 뚜렷하고 겨울에는 양의 상관관계가 지배적이다. 겨울에 EU1 지역의 기온 및 강수량은 NAO와 양의 상관성을 갖는다. 겨울에는 다우해에 아조레스 고기압과 아이슬란드저기압이 강화되어, 북대서양에서 대기 상 · 하층의 서풍이 강해지고 EU1 지역으로 향하는 수분이류가 증가한다. 이는 NAO가 양의 값을 갖는 패턴과 유사하며, EU1 지역은 기온이 상승되고 강수가 증가된다. 따라서 EU1 지역의 겨울 기온과 강수는 NAO의 변동의 영향으로 동시에 증가되거나 감소되어 양의 상관관계가 형성된다.

HadGEM2-AO의 과거기후 모의실험에서 나타난 동아시아와 유럽의 기온과 강수의 상관관계는 RCP8.5에 기반한 21세기 말에는 지역별로 다른 변화가 전망된다. EA1 지역에서 20세기 말 여름에 기온과 강수 사이에서 나타나는 음의 상관관계는 21세기 말에 약해질 것으로 전망되며, 이는 온난화에 의한 강수량의 증가가 관련된 것으로 판단된다. 반면 EU1 지역은 여름에 기온과 강수량간의 음의 상관성이 21세기 말에 더 강해지는데, 이는 온난화에 따른 여름 NAO의 변화와 관련하여 여름 강수가 기후특성(다우, 과우)에 관계없이 현저히 감소하기 때문으로 생각된다.

미래기후변화 전망에 따르면 겨울에 EA1의 기온-강수의 양의 상관성은 증가할 것으로 예상된다. 이는 동아시아 겨울몬순 순환과 기온 및 강수량의 상관성이 미래에 더욱 뚜렷해지고 다우해와 과우해 사이에 이 순환과 기온의 변동성이 증가하는 것과 관련 있다. EU1 지역 역시 겨울 기온과 강수의 양의 상관성이 미래에는 뚜렷하게 증가할 것으로 전망된다. 이는 미래에 NAO와 관련된 북대서양에서 남 · 북간의 해면기압차이가 다우해에 증가, 과우해에 감소하여 강수변동에 따른 NAO의 변동이 더욱 증가하여 과거에는 뚜렷하지 않던 NAO와 강수의 상관관계가 미래에는 양

의 상관성이 유의하게 나타나는 것과 관련 있는 것으로 판단되나, 향후 이에 대한 더 자세한 분석이 필요하다.

이 연구를 통해 여름과 겨울에 우리나라와 유럽북부의 기온과 강수간의 관계에 대한 지역적 특성을 살펴보았다. 특히 겨울을 중점으로 두 기후요소간의 상관관계는 동아시아 겨울몬순과 NAO의 주요 기후모드 변동에 따른 해양으로부터의 온난이류 강도변화와 관련되어있음을 보였다. 미래변화는 온난화 외에도 각 지역의 겨울기후와 관련된 대기순환 변동이 기온과 강수량의 관계에 영향을 미침을 알 수 있었다.

각 지역의 계절별 기온과 강수의 변동과 관련된 기후시스템에 대한 이해는 기온변화에 따른 강수의 변화를 예측하는데 있어서 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 이 연구에서는 우리나라와 유럽 일부 지역에 국한하여 겨울에 대해 중점적으로 분석하였으나 몬순과 NAO 외에도 다른 기후변동모드뿐만 아니라 여름에 대한 분석이 추가되어야 할 것이다. 또한 기후시스템이 내륙, 해안지역 등에 미치는 영향에 대해서 보다 더 지역적으로 세밀한 분석이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국립기상과학원 주요사업 '기상업무지원 기술개발연구(NIMS-2016-3100)'의 일환으로 수행되었습니다. 이 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다.

REFERENCES

Allan, R. P., C. Liu, M. Zahn, D. A. Lavers, E. Koukouvagias, and A. Bodas-Salcedo, 2014: Physically consistent responses of the global atmospheric hydrological cycle in models and observations. *Surv. Geophys.*, **35**, 533-552, doi:10.1007/s10712-012-9213-z.

Collins, W. J., and Coauthors, 2008: Evaluation of the HadGEM2 model. Hadley Centre Technical Note 74, 47 pp. [Available online at http://www.metoffice.gov.uk/learning/library/publications/science/climate-science.].

Endo, H., and A. Kitoh, 2014: Thermodynamic and dynamic effects on regional monsoon rainfall changes in a warmer climate. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1704-1710, doi:10.1002/2013GL059158.

Fleig, A. K., L. M. Tallaksen, P. James, H. Hisdal, and K. Stahl, 2015: Attribution of European precipitation and temperature trends to changes in synoptic circulation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **19**, 3093-3107, doi:10.5194/hess-19-3093-2015.

Folland, C. K., J. Knight, H. W. Linderholm, D. Fereday, S. Ineson, and J. W. Hurrell, 2008: The summer North Atlantic Oscillation: Past, present, and future. *J. Climate*, **21**, 1082-1103, doi:10.1175/2008JCLI2459.1.

Hartmann, D. L., and Coauthors, 2013: Observations: Atmosphere and surface. In Stocker, T. F. et al. Eds., *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 159-254.

Held, I. M., and B. J. Soden, 2006: Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J. Climate*, **19**, 5686-5699, doi:10.1175/JCLI3990.1.

Hurrell, J. W., 1995: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, **269**, 676-679.

Jhun, J.-G., and E.-J. Lee, 2004: A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J. Climate*, **17**, 711-726, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0711:ANEAWM>2.0.CO;2.

Lee, Y.-Y., G.-H. Lim, and J.-S. Kug, 2010: Influence of the East Asian winter monsoon on the storm track activity over the north pacific. *J. Geophys. Res.*, **115v** D09102, doi:10.1029/2009JD012813.

Lehmann. J., and D. Coumou, 2015: The influence of mid-latitude storm tracks on hot, cold, dry and wet extremes. *Sci. Rep.*, **5**, 17491, doi:10.1038/srep17491.

Madden, R. A., and J. Williams, 1978: The correlation between temperature and precipitation in the United States and Europe. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 142-147.

Rehfeld, K., and T. Laepple, 2016: Warmer and wetter or warmer and dryer? Observed versus simulated covariability of Holocene temperature and rainfall in Asia. *Earth Planet. Sc. Lett.*, **436**, 1-9, doi:10.1016/j.epsl.2015.12.020.

Trenberth, K. E., and D. J. Shea, 2005: Relationships between precipitation and surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14703, doi:10.1029/2005GL022760.

Yoon, J.-S., I.-U. Chung, and S.-H. Shin, 2015: Performance of CMIP5 Models for the relationship between variabilities of the North Pacific Storm Track and East Asian Winter Monsoon. *Atmosphere*, **25**, 295-308, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.295 (in Korean with English abstract).

Zhao, W., and M. A. K. Khalil, 1993: The relationship between precipitation and temperature over the contiguous United States. *J. Climate*, **6**, 1232-1236.