

## A2 시나리오를 이용한 아시아 지역 기후대의 변화 전망

### Future Projections of Köppen Climate Shifts in the Asia Regions Using A2 Scenario

신상훈\* / 배덕효\*\*

Shin, Sang Hoon / Bae, Deg Hyo

#### Abstract

The objective of this study is to analyse the current climate zone applied by Köppen climate classification and the future climate zone projected by the A2 scenario in Asia regions. The spatial and temporal variations of precipitation and temperature were also analyzed. As regards to the result of analysis on the variation of climate factor, temperature and precipitation will be increasing 4.0°C and 12% respectively in the 2080s comparing with the reference period (1991~2010). Spatially, the range of temperature increase on the high latitude area is higher than that on the low latitude area. The precipitation will be increasing averagely in the overall area, but the spatial unequal distribution of precipitation will be intensified. At the result of the future climate zone, the area of warm climates will be increasing while the area of cold climates will be decreasing. In 2080s, the temperature will be increasing as much as 7.2% and 1.9% on the Tropical climates and Arid climates respectively, but it will be decreasing as -2.4%, -4.9% and -1.8% on the Warm temperate climates, Cold climates and Polar climates respectively. Furthermore, the part of Savannah climates and Desert climates will be mostly increasing. It is mainly caused by the temperature increase and desertification impact according to global warming.

**Keywords** : Köppen climate classification, climate change, Asia, global data, A2 scenario

#### 요 지

본 연구에서는 쾨펜의 기후대 구분법을 이용하여 현재 아시아 지역(경도 55.6°~149.3°, 위도 -11.5°~53.0°) 기후대를 분석하고, IPCC SRES A2 시나리오 상황에서의 기후대 변화를 전망하였다. 이와 더불어 기후대 구분의 기준이 되는 강수 및 기온자료의 시공간적 변동성을 분석하였다. 기후요소의 변동성을 분석한 결과, 2080년경에는 기준기간(1991~2010)에 비해 기온은 4.0°C, 강수량은 12% 증가할 것으로 전망되었다. 공간적으로는 기온의 경우 고위도 지역이 저위도 지역보다 기온상승폭이 크게 나타났으며 강수량은 지역적 편중이 심화될 것으로 전망되었다. 기후대 변화를 전망한 결과, 대체로 온난한 기후대의 면적은 증가한 반면, 한랭한 기후대의 면적은 감소하는 것으로 분석되었다. 기준기간 대비 2080년경에는 열대 기후대(A)의 경우 7.2%, 건조 기후대(B)는 1.9% 증가하였으며 온대 기후대(C), 냉대 기후대(D), 한대 기후대(E)는 각각 -2.4%, -4.9%, -1.8% 감소하는 것으로 전망되었다. 이러한 결과는 지구온난화에 따른 기온 증가와 사막화의 영향에 기인한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 쾨펜의 기후구분, 기후변화, 아시아, 전지구자료, A2 시나리오

\* 세종대학교 공과대학 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: hjhssh@naver.com)

Ph.D Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

\*\* 교신저자, 세종대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr, Tel: 02-3408-3814)

Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

## 1. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; 이하 IPCC) 4차 평가보고서에 따르면 21세기말 지구의 평균기온은 최대 6.3°C까지 증가할 것으로 전망되었다(IPCC, 2007). 우리나라의 경우 20세기동안 기온은 전지구 평균보다 2배 이상 높은 1.5°C 정도 상승하였으며, 최근 50년간의 강수일수는 감소한 반면 일강수량이 80 mm 이상인 호우의 발생빈도는 증가되고 있다고 보고되었다(Choi, 2002). Bae et al. (2008a)에 의하면 최근 30년 동안 연강수량과 유출량은 증가추세를 보이고 있으며, Jung et al. (2010)은 연강수량 증가의 원인이 여름철 강우강도와 빈도가 증가하는 것과 관련되어 있음을 보였다. 이는 가뭄과 홍수와 같은 극치사상의 발생 빈도와 강도가 증가할 가능성을 보여주는 것으로, 향후 이러한 영향이 지속된다면 수자원 관리 및 계획 수립에 많은 어려움을 야기할 것으로 판단된다.

실제로 최근 전지구적으로 이상기후에 따른 피해가 증가하고 있으며 특히, 아시아 지역의 경우 작년 피해만 살펴봐도 중국 동부 산둥성에서는 60년 만의 겨울 가뭄으로 24만 명이 식수난을 겪었고 400만ha 농경지의 용수난이 발생하였으며, 태국에서는 7월부터 11월까지 식 달걀 계속되는 폭우로 약 18조원의 재산 피해가 발생하였고, 국토의 1/3이 침수되었다. 또한 필리핀에서는 1월에 3주간의 폭우로 홍수가 발생하여 58명이 사망하고 100만 명이 수해 피해를 입었다. 국내의 경우 2010년 9월에는 서울에 시간당 100 mm 이상의 집중호우로 광화문지역이 침수피해를 입었으며, 2011년 2월에는 동해시에 최심적설 102.9 cm 기록하였다. 또한 7월에는 집중호우로 인해 서울 우면산과 강원 춘천 등에서 최악의 산사태가 발생하였고, 9월 중순에는 남부지방을 중심으로 폭염이 발생하였다. 이미 아시아 지역은 지구평균을 웃도는 온난화가 진행되고 있으며, 기후변화에 대한 적응정도는 매우 취약한 것으로 보고되었다(IPCC, 2007). 또한, 아시아 국가들의 가장 중요한 경제 원천인 농업의 경우 전세계 쌀 공급량의 약 90%와 밀 공급량의 약 40%를 생산하고 있지만 대부분의 농경지가 저위도(북위 30° 이하) 지역에 위치하기 때문에 기후변화에 따른 물부족에 직면할 가능성이 높다(FEU-US, 2011). 이러한 물부족에 따른 아시아 개도국들의 곡물 생산량 저하는 국제 곡물가격의 상승으로 이어져 세계 5위의 곡물 수입국인 우리나라의 식량안보까지 위협할 수 있다. 따라서 기후변화로 인한 피해로부터 아시아 지역의 물안보를

확보하기 위해서는 미래의 기후 및 수자원을 전망하는 연구가 필요하다.

한편, 국내에서는 기후변화에 따른 수자원의 영향을 분석하는 연구가 지속적으로 수행되어왔으나(e.g. Bae et al., 2007; Bae et al., 2008b; Bae et al., 2011; Jung et al., 2007; Kim et al., 2005; Kim et al., 2007; Lee et al., 2011), 아시아 지역과 연계한 연구는 전무한 실정이다. 그러나 국외의 수문기상 선진국들은 전지구적으로 발생하는 기후변화에 대응하기 위해 해석범위를 인접국가 및 전 세계로 확장하여 수문현상을 규명하고 있는 추세이다. 일반적으로 수문순환 측면의 기후변화는 기온 상승에 따른 식물과 토양의 증발산을 증가시켜 갈수기의 하천유량을 더욱 감소시킬 수 있으며, 강수량 및 강수일수의 변화는 홍수 및 가뭄 빈도의 증가로 나타날 수 있다. 이러한 기온과 강수량의 패턴 변화에 따른 하천유량의 변동성을 분석하기 위해서는 우선적으로 현재의 기후요소를 분석하고 미래 기후를 전망하는 과정이 선행되어야 하며, 이는 기후변화에 따른 수자원 영향평가에 가장 필수적인 정보이다.

지금까지 수문기상 관측자료 및 온실가스배출시나리오를 기반으로 지역적으로 나타나는 기후특성을 구분하고 분석하는 연구가 수행되어왔다. 국외에서는 Fraedrich et al. (2001)은 격자화 된 관측자료인 CRU(Climatic Research Unit)자료를 이용하여 20세기 동안 전지구 기후대의 면적 변화를 분석하였으며, Kalvova et al. (2002)은 GCM 결과를 이용하여 미래 기후대 변화를 전망하였다. Wang and Overland (2004)는 20세기 동안 북극지역의 기후변화 영향을 분석하였고, Beck et al. (2005)은 CRU 기온자료와 GPCC (Global Precipitation Climatology Centre)에서 제공하는 VASCLIMO 월평균 강수량자료를 이용하여 20세기 후반의 기후대 변화를 분석하였다. 국내에서는 Kwon et al. (2007)이 A1B시나리오를 이용하여 국내 아열대 기후 지역의 변화를 전망하였으며, Jung and Shin (2011)은 20세기 전지구 기후대의 면적 변화와 사막화의 특징을 분석하였다. 이와 같이 기후대 분포 및 면적 변화를 분석하여 기후변화 영향을 제시하는 연구가 활발히 진행되어 온 것을 알 수 있으나, 기후변화에 취약한 아시아 지역에 대한 분석과 전망 결과는 구체적으로 제시되지 못한 상황이다. 이에 본 연구에서는 아시아 지역(경도 55.6~149.3°, 위도 -11.5~53.0°)의 기후변화에 따른 수문순환의 영향을 분석하기 위해 A2 시나리오 상황에서 강수와 기온의 시공간적 변동성을 분석하고, 그에 따른 기후대의 변화를 전망하였다.

## 2. 방법론

### 2.1 쾨펜 기후대 구분법

기후는 보통 30년 동안 어느 지역에 나타나는 평균적인 일기 상태로 여러 기후요소(기온, 기압, 습도, 강수량, 풍향, 풍속, 운량, 일사량 등)의 평균과 변화량을 모두 포함하므로 매우 복잡하며, 지역에 따라 상이하게 나타난다. 이러한 기후요소에서 유사성을 찾아내고 조직화하는 과정이 기후대 구분이다. 기후대 구분의 방법은 크게 경험적인 기법과 통계적인 기법으로 나눌 수 있다. 우선 경험적인 기법에는 식생의 분포 등을 기후구분의 지표로 선정하여 그것에 영향을 미치는 기온과 강수량을 이용하는 쾨펜(Köppen)의 방법, 강수량과 최대가능 증발산량에서의 물수지를 기초로 하여 기후구분을 실시한 손스웨이트(Thorntwaite)의 방법 등이 있다. 통계적인 기법은 주성분분석(Principal Component Analysis), 군집분석(Clustering Analysis), 요인분석(Factor Analysis) 등을 이용하는 것이다. 일반적으로 관측자료를 직접 이용하는 경험적 방법이 보편화되어 있으며, 전 지구 또는 대규모 지역구분에 적절하다. 따라서 본 연구에서는 현재 가장 널리 사용되고 있으며, 기후형 및 기후지역 분류의 표준이 되는 쾨펜의 기후 구분법(Köppen's classification of climate)을 적용하였다.

쾨펜은 프랑스의 물리학자 Alphonse de Candoll의 식물

분포도에 착안하여 식물분포의 경계와 일치되는 기온과 강수량을 결정하고 그것을 기초로 하여 세계 기후를 열대 기후(A), 건조기후(B), 온대기후(C), 냉대기후(D), 한대기후(E)로 구분했으며 B를 제외한 다른 기후형은 기온에 따라 구분했다. B형은 건조도에 의해 구분되었는데, 식생에 수분을 공급하는 강수량과 증발산과 관련된 기온에 의해 건조기후(BW)와 스텝기후(BS)로 세분된다. A, C, D형 기후는 연중 강수량 분포에 따라 세분되었으며, E형 기후는 식생이 자랄 수 있는지에 따라 툰드라기후(ET)와 빙설기후(EF)로 구분되었다. Table 1은 본 연구에서 적용한 쾨펜의 기후대 설명과 경계조건을 나타낸 것으로 처음의 5개 대분류와 중분류를 거쳐 13개의 기후형으로 세분됨을 알 수 있다. 각 기후대의 특징을 살펴보면 A기후는 남북 위 15° 이내의 저위도 지역에 나타나는 기후로 최한월의 평균기온이 18°C 이상으로 고온이며 일교차가 크고, 강수량에 의한 건기와 우기의 연주기 변화가 나타난다. B기후는 전지구 육지면적의 30%를 차지하고 있으며 대부분이 남북위 15~30° 지역에 나타나는 기후로 강수량이 적고 증발량이 많아 식물이 거의 자랄 수 없는 사막, 초원 지역에서 볼 수 있다. C기후는 중위도 지역에 나타나는 기후로 최한월의 평균기온이 18~-3°C이며 열대와 한대 기단의 영향을 받아 기온의 변화가 심하고 4계절의 변화가 나타난다. D기후는 북반구의 온대와 한대 기후 사이에 발달

Table 1. Description of Köppen Climate Symbols and Defining Criteria

Type		Description	Criterion
1st	2nd		
A Tropical	Af	Rainforest	$T_{\min} \geq +18^{\circ}\text{C} \ \& \ P_{\min} \geq 60 \text{ mm}$
	Am	Monsoon	$T_{\min} \geq +18^{\circ}\text{C} \ \& \ \text{Not}(\text{Af}) \ \& \ P_{\min} \geq 100 - P_{\text{ann}}/25$
	Aw	Savannah	$T_{\min} \geq +18^{\circ}\text{C} \ \& \ \text{Not}(\text{Af}) \ \& \ P_{\min} < 100 - P_{\text{ann}}/25$
B Arid	BS	Steppe climate	$P_{\text{ann}} < 10P_{\text{th}} \ \& \ P_{\text{ann}} > 5P_{\text{th}}$
	BW	Desert climate	$P_{\text{ann}} < 10P_{\text{th}} \ \& \ P_{\text{ann}} \leq 5P_{\text{th}}$
C Warm temperate	Cs	dry summer	$-3^{\circ}\text{C} < T_{\min} < +18^{\circ}\text{C} \ \& \ P_{\text{smin}} < P_{\text{wmin}} \ \& \ P_{\text{wmax}} > 3P_{\text{smin}} \ \& \ P_{\text{smin}} < 40 \text{ mm}$
	Cw	dry winter	$-3^{\circ}\text{C} < T_{\min} < +18^{\circ}\text{C} \ \& \ P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}} \ \& \ P_{\text{smax}} > 10P_{\text{wmin}}$
	Cf	without dry season	$-3^{\circ}\text{C} < T_{\min} < +18^{\circ}\text{C} \ \& \ \text{Neither Cs nor Cw}$
D Cold	Ds	dry summer	$T_{\min} \leq -3^{\circ}\text{C} \ \& \ P_{\text{smin}} < P_{\text{wmin}} \ \& \ P_{\text{wmax}} > 3P_{\text{smin}} \ \& \ P_{\text{smin}} < 40 \text{ mm}$
	Dw	dry winter	$T_{\min} \leq -3^{\circ}\text{C} \ \& \ P_{\text{wmin}} < P_{\text{smin}} \ \& \ P_{\text{smax}} > 10P_{\text{wmin}}$
	Df	without dry season	$T_{\min} \leq -3^{\circ}\text{C} \ \& \ \text{Neither Ds nor Dw}$
E Polar	ET	Tundra climate	$T_{\text{max}} < +10^{\circ}\text{C} \ \& \ 0^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < +10^{\circ}\text{C}$
	EF	Frost climate	$T_{\text{max}} < +10^{\circ}\text{C} \ \& \ T_{\text{max}} < 0^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{ann}}$ : mean annual temperature(°C),  $T_{\text{max}}$ : temperature of the hottest month(°C),  $T_{\text{min}}$ : temperature of the coldest month(°C),  $P_{\text{ann}}$ : annual precipitation (mm/year),  $P_{\text{min}}$ : precipitation of the driest month(mm/month),  $P_{\text{smin}}$ : precipitation of the driest month in summer (mm/month),  $P_{\text{smax}}$ : precipitation of the wettest month in summer(mm/month),  $P_{\text{wmin}}$ : precipitation of the driest month in winter (mm/month),  $P_{\text{wmax}}$ : precipitation of the wettest month in winter(mm/month),  $P_{\text{th}}$ : dryness threshold, varies according to the following rules (if 70% of  $P_{\text{ann}}$  occurs in winter then  $P_{\text{th}}=2 \times T_{\text{ann}}$ , if 70% of  $P_{\text{ann}}$  occurs in summer then  $P_{\text{th}}=2 \times T_{\text{ann}}+28$ , otherwise  $P_{\text{th}}=2 \times T_{\text{ann}}+14$ ).

하는 기후로 최한월의 평균기온이  $-3^{\circ}\text{C}$  이하이며 겨울이 춥고 길며 여름은 짧고 비교적 기온이 높다. E기후는 고위도 지역인 그린란드 중앙부나 남극대륙에 나타나며 얼음이나 눈에 덮여있는 빙설기후와 이끼식물이나 지의류가 생육할 수 있는 툰드라 기후로 나뉜다. A와 C기후의 한계인 최한월 평균기온  $18^{\circ}\text{C}$ 는 고온다우를 요하는 열대 식물분포의 한계선이고, D와 E기후의 경계인 최한월 평균기온  $10^{\circ}\text{C}$ 는 수목성장의 한계선이다. 즉 식물의 생육은 겨울 사이의 저온보다 식물성장기의 온도에 의하여 좌우되고 있다.

## 2.2 기후시나리오

기후시나리오를 생산하는 가장 보편화 된 방법은 GCM의 실험 결과들을 사용하는 것이다(Bae and Jung, 2008). 이 방법은 온실가스배출시나리오를 GCM의 경계자료로 입력하여 각 시나리오에 따른 기후변화를 모의하게 된다. 하지만 지역규모의 기후변화 전망에 GCM결과를 직접 활용하기에는 공간해상도가 낮다는 한계가 있으므로 지점이나 지역규모로 상세화하는 과정을 거쳐 지역 기후시나리오를 산출하게 된다. IPCC Data Distribution Center (<http://www.ipcc-data.org>)에서는 SRES를 기초로 생산된 23개 GCM 결과를 제공하고 있으며, 국립기상연구소(METRI)에서는 23개 GCM 결과를 수집하여  $2.5 \times 2.5^{\circ}$ 로 등격자화 하였다(Kim et al., 2008). 본 연구에서는 이 자료 중에서 IPCC AR4(Fourth Assessment Report)에 적용된 A2 온실가스배출시나리오의 ECHO-G 결과를 이용하였다. A2 온실가스배출시나리오는 높은 인구증가율, 높은 에너지 사용률, 토지피복의 빠른 변화와 점진적인 대안 기술의 개발 등을 가정한 것으로  $\text{CO}_2$  농도가 2100년경 820 ppm까지 증가하고, 지구평균기온이 현재보다  $4.6^{\circ}\text{C}$  정도 증가할 것으로 전망한 시나리오이다. ECHO-G 지구 시나리오로부터 아시아 지역규모의 기후시나리오를 생산하기 위해 통계적 상세화 기법 중 하나인 Delta method를 이용하였다. 이 기법은 GCM 시뮬레이션 결과 중 기준기간과 미래기간의 변화율을 산정한 후 관측자료에 적용하여 기후시나리오를 생산하게 된다. 또한 적용이 간단하기 때문에 다수의 시나리오에 쉽게 적용이 가능하며, 평가지역의 기후를 그대로 반영할 수 있다는 장점이 있다(Fowler et al., 2007). 이미 여러 기후변화 연구(Snober et al., 2003; Elsner et al., 2010; Liu et al., 2010)에서도 적용성이 제시되고 있어 본 연구의 기후시나리오 생산에 적용하기에 적합하다고 판단하였다. 일반적으로 Delta method는 계절 혹은 월에 따른 기온이나 강수의 변화를

반영하기 위해 GCM 결과의 월별 변화율을 산정하여 각 월에 적용하게 된다.

$$P_{future} = P_{obs} \times \frac{P_{fut.mo}}{P_{ref.mo}} \quad (1)$$

$$T_{future} = T_{obs} + (T_{fut.mo} - T_{ref.mo}) \quad (2)$$

여기서,  $P_{fut.mo}$ 는 미래기간의 GCM 월강수량,  $P_{ref.mo}$ 는 기준기간의 GCM 월강수량,  $T_{fut.mo}$ 는 미래기간의 GCM 월평균기온,  $T_{ref.mo}$ 는 기준기간의 GCM 월평균기온을 나타낸다. 관측소 지점으로 상세화된 기후시나리오를 이용하여 기후대의 공간적 분포를 표현하기 위해서 역거리 가중법을 이용하여  $0.5 \times 0.5^{\circ}$  해상도로 격자화하였다.

## 3. 대상지역 및 자료수집

### 3.1 대상지역

일반적으로 아시아는 크게 6개 지역으로 구분되며 아시아 대륙의 면적은  $44,579,000 \text{ km}^2$ 으로 47개의 국가에 세계 인구 전체의 60% 정도가 거주하고 있다. 지형학적 구분에 따르면, 북아시아는 광활한 시베리아와 아시아 대륙 북동연변부로 이루어지며, 동아시아에는 시베리아 극동 지방과 동아시아 제도, 한국, 중국의 동부 및 북동부가 포함되고, 중앙아시아는 티베트 고원과 준가얼 분지 및 타림 분지, 내몽골, 고비 사막, 다쉐 산맥으로 이루어진다. 남아시아에는 인도 반도, 인도-갠지스 평원, 히말라야 산맥이 포함되고, 서아시아는 소아시아, 아르메니아, 이란 등으로 이루어진 서아시아 고지대와 레반트, 아라비아 반도로 이루어진다. 동남아시아에는 필리핀 제도와 말레이 열도, 인도차이나 반도 등이 속해있다. 본 연구에서는 인구밀도가 낮은 북아시아와 중동지역에 속하는 서아시아를 제외한 중앙아시아, 동아시아, 남아시아, 동남아시아를 기준으로 Fig. 1과 같이 적용지역을 선정하였다. 선정 범위는 서쪽으로 우즈베키스탄( $55.6^{\circ}$ ), 북쪽으로는 중국( $53.0^{\circ}$ ), 동쪽으로는 일본( $149.3^{\circ}$ ), 남쪽으로는 인도네시아( $-11.5^{\circ}$ )를 경계로 하였고, 범위 내에는 총 27개의 국가가 포함되어 있다.

### 3.2 자료수집

기후자료의 불확실성을 줄이고 신뢰성 있는 보정을 위해서는 최소한 20년 이상의 자료가 필요하다(Semenov and Barrow, 2002). 따라서 본 연구에서는 아시아 지역을 대상으로 국가기후자료센터(National Climate Data Center, NCDC)에서 제공하는 기상자료(강수량, 평균기온, 최고기

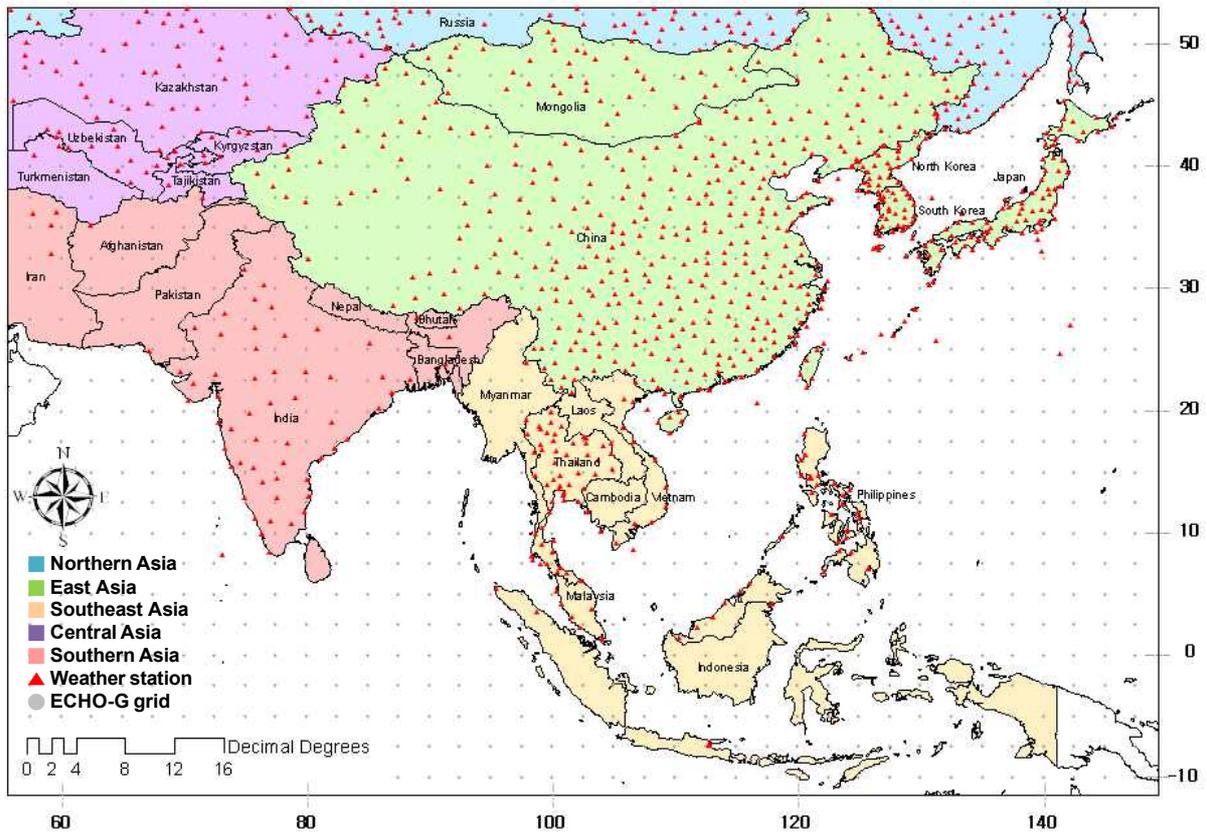


Fig. 1. Study Areas and Location of Weather Stations

온, 최저 기온, 이슬점 온도, 풍속)를 수집하였으며, 자료 기간은 1970~2011년으로 정하였다. 수집된 자료에 대해서는 다음 Table 2에서와 같이 국가별 가용기간을 분석하였다. 각 분석기간은 20년, 30년으로 구분하여 나타내었으며 금회 연구에서 채택한 범위를 벗어나는 부분의 관측소 (이란, 러시아)와 결측 개수가 해당 기간 동안에 보정할 수 없는 범위에 있는 것 들은 제외시켰다. 분석결과 자료 기간 20년 이상의 관측소 수와 30년 이상의 관측소 수와의 차이가 325 개소로 나타났으며, 이에 따라 본 연구에서는 보다 신뢰성 높은 기후대분석을 위해 자료기간 20년 이상의 관측소를 대상으로 기상자료를 구축하였다. 대상 관측소별 기상자료의 이상치 또는 결측치에 대해서는 기온의 경우 결측일 전날과 다음날 자료를 평균하여 이용하였으며, 강우의 경우 인근관측소의 자료를 이용하여 보정하였다. 한편, 구축된 아시아지역의 기상자료에 대해서 정확도가 얼마나 되는지 평가하는 과정이 필요하나 Son (2010)의 선행연구에서 전지구자료와 국내 관측자료를 비교한 결과 평균 월강수량의 패턴이 유사하다고 제시된 바 있어 본 연구에서는 생략하였다.

## 4. 적용결과

### 4.1 기준기간의 아시아 기후대 구분

#### 4.1.1 기후요소 분포

본 연구에서는 기준기간(1991~2010년)의 아시아 기후대를 구분하기에 앞서 구축된 기후자료의 공간적 분포 특성을 규명하기 위해 기준기간 20년 동안의 연평균기온과 연강수량을 Fig. 2에 도시하였다. 연평균기온의 분포는 적도지역에서 고위도로 갈수록 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 동남아시아 지역은 17~32°C, 남아시아 지역은 5~32°C, 중앙아시아 지역은 -3~20°C, 동아시아 지역은 -6~20°C, 북아시아 지역은 -6~0°C로 나타났다. 특히 우리나라의 경우 연평균기온이 12.9°C로 나타났으며 이는 기상청에서 분석한 연대별 기상요소 값인 12.8°C와 근사한 값을 알 수 있다. 연평균강수량의 경우 해안보다는 내륙지역이 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 적도지역의 연강수량은 1,750~4,250 mm에 달하며, 해풍의 영향을 받는 남아시아, 동남아시아 및 동아시아 해안지역의 연강수량은 1,250~3,000 mm로 나타났다. 내륙지역의 중앙아시아 및 동아시아 사

Table 2. Status of Weather Stations in Asia Countries

No.	Country	ID	Number of Weather Stations		
			Total	Over 20 years of Data Period	Over 30 years of Data Period
1	Afghanistan	AF	111	0	0
2	Bangladesh	BG	42	0	0
3	Cambodia	CB	8	0	0
4	China	CH	976	385	348
5	India	IN	151	56	42
6	Indonesia	ID	139	24	1
7	Iran	IR	116	4	0
8	Japan	JA	313	111	85
9	Kazakhstan	KZ	221	52	17
10	Kyrgyzstan	KG	24	6	3
11	Laos	LA	43	1	0
12	Malaysia	MY	30	14	12
13	Mongolia	MG	69	39	22
14	Nepal	NP	12	0	0
15	North korea	KN	29	27	13
16	Pakistan	PK	76	1	0
17	Philippines	RP	71	27	9
18	Russia	RS	289	122	66
19	Singapore	SN	6	1	0
20	South korea	KS	148	32	25
21	Sri lanka	CE	22	0	0
22	Taiwan	TW	66	7	6
23	Tajikistan	TI	40	3	0
24	Thailand	TH	167	56	50
25	Turkmenistan	TX	45	15	11
26	Uzbekistan	UZ	41	17	8
27	Vietnam	VM	74	13	1
Total			3,329	1,013	719

막지대의 연강수량은 100~250 mm에 불과하다. 또한, 파키스탄과 이란의 해안지역의 경우 강수량이 200 mm로 낮게 나타났는데 이는 가용한 관측자료가 없어 가장 가까운 내륙지역의 자료를 공간보간한 것에 기인한 것으로 판단된다.

4.1.2 기준기간의 쾨펜 기후대 구분

본 연구에서는 앞서 수집된 기온과 강수량 자료들을 기반으로 쾨펜의 기후구분 법을 이용하여 현재 기후상황에서 아시아 지역의 기후특성을 구분하였다(Fig. 3). 위도에 따른 기후대를 살펴보면 Af기후대는 북위 10° 이하의 인

도네시아, 말레이시아와 필리핀에 분포하고 있으며, Am 기후대는 적도에서 북위 20° 이하의 인도네시아의 대순다 열도의 북부지방과 캄보디아, 베트남에 분포하고 있다. Aw기후대는 북위 10° 이상 23° 이하의 인도, 태국, 미얀마, 라오스, 캄보디아, 스리랑카에 위치하고 있다. 북위 23° 이상 40° 이하에는 C기후대가 분포하고 있는데, 그 중 여름철이 건조하고, 겨울철이 습윤한 Cs기후대는 인도의 힌두스탄 평원지역 일부에 나타나고 있다. Cw기후대는 파키스탄 동부지역부터 인도 힌두스탄 평원지역과 중국의 남부 및 동부 내륙 지역을 거쳐 남한 내륙까지 분포되어 있다. 아열대 습윤 기후인 Cf기후대는 중국의 동남부지역,

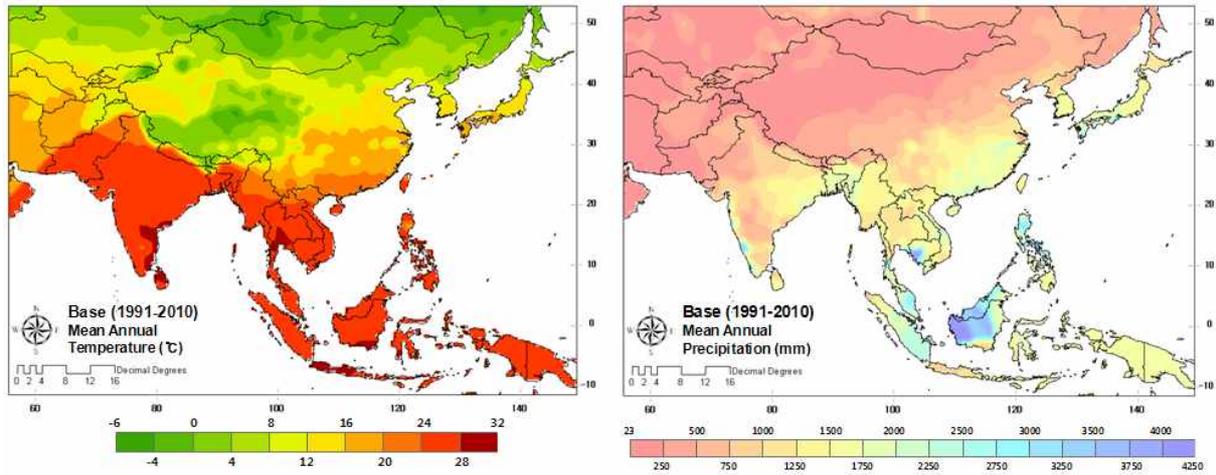


Fig. 2. Mean Annual Temperature and Precipitation in Reference Period

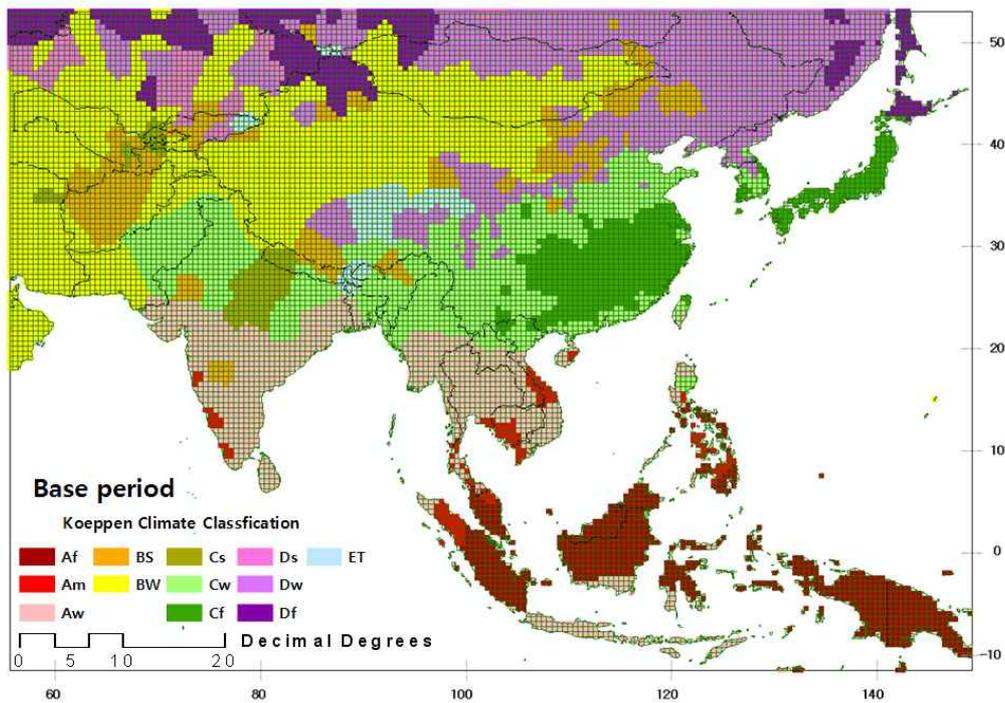


Fig. 3. The Spatial Distribution of Köppen Climate Classification for the Period 1991~2010

남한의 해안 지역과 일본의 홋카이도를 제외한 모든 지역에서 나타나고 있다. 북위 38° 이후부터는 B기후대와 D기후대가 분포하고 있는데 B기후대의 경우 티베트 고원 북쪽으로 타클라마칸 사막을 중심으로 서쪽으로는 이란고원, 동쪽으로는 고비사막까지 분포되어 있다. BW기후대와 그 주위에 BS기후가 나타나는 것을 볼 수 있다. D기후대는 중국 북동부 지역, 몽골 북부 지역, 북한, 러시아 극동 지역, 일본의 홋카이도 섬에 분포하고 있으며, E기후대 중 ET기후대가 히말라야 산맥지역에 일부 나타나는 것을 알

수 있다. 특히, 한반도의 경우 북쪽에는 Dw기후, 해안지방에는 Cf, 내륙지방에는 Cw기후가 분포하고 있어 현재의 기후특성을 적절히 반영한다고 할 수 있다.

## 4.2 미래기간의 아시아 기후대 전망

### 4.2.1 미래기간의 기후 변동성 평가

0.5×0.5° 해상도로 생산된 기후시나리오의 특성을 규명하기 위해 각 분석기간별 기온, 강수량의 공간적인 변

화를 분석하였다. Fig. 4는 기준기간에 대한 분석기간에서의 상대적인 기온의 변화를 나타낸 것으로 모든 기간에서 고위도 지역이 저위도 지역보다 기온상승폭이 큰 것을 알 수 있다. 2020s기간 동안에는 아시아 지역의 연평균기온이 0.62℃ 상승한 반면에 히말라야 산맥이 있는 네팔과 부탄 지역은 최대 -0.58℃ 감소하였으며, 한반도의 경우 남한지역은 대략 0.5℃ 북한지역은 0.7℃ 증가하였다. 2040s 기간에는 연평균기온이 1.23℃ 상승하였고 몽골지역의 경우 최대 2.5℃까지 상승한 것으로 나타났다. 우리나라의 남부 지방은 0.75℃, 중부지방은 1.1℃ 정도 상승하였다. 2060s와 2080s기간에는 더욱 증가하여 각각 0.82~3.95℃, 1.99~5.91℃까지 연평균기온이 증가할 것으로 전망되었다. 이러한 연평균 기온의 증가는 겨울철의 적설 및 용설의 시기 변화와 증발산량의 증가로 이어져 이수기 하천유량의 감소를 유발할 가능성이 높다.

연평균 강수량의 경우 모든 기간에서 평균적으로 증가하나, 지역적 편차가 심화되는 것으로 나타났다. Fig. 5는 상대적 변화율로 1이면 기준기간과 동일한 것을 의미하며, 1보다 크면 증가, 작으면 감소를 의미한다. 2020s기간 동안에는 전 지역의 연평균 강수량이 2% 정도 증가될 것으로 전망되었으나 우리나라를 비롯한 중국, 우즈베키스

탄, 투르크메니스탄, 아프가니스탄, 타지키스탄, 키르기스스탄, 일본, 러시아 지역의 경우 4~20% 감소할 것으로 나타났다. 2040s기간에서는 중국의 황하강 유역과 인도의 인더스강 유역의 강수량이 최대 25%까지 증가하였고 티베트 고원, 타클라마칸 사막과 이란 고원 지역은 강수량이 감소할 것으로 예상되었다. 2060s와 2080s기간에는 각각 7%, 10% 정도 강수량이 대부분 지역에서 증가하였으나, 타클라마칸 사막과 이란 고원 지역은 여전히 강수량이 감소하는 것으로 전망되었다. 이러한 강수량의 변화는 홍수와 가뭄의 빈도 및 강도의 변화와 그에 따른 유역 물관리의 어려움을 가중시킬 수 있다.

#### 4.2.2 미래기간의 기후대 변화 전망

본 연구에서 적용한 쾨펜의 기후대 구분법은 기온과 강수량에 민감한 식생의 분포를 기초로 기후대를 구분하는 것으로 기후변화에 따른 수문순환의 변화를 비교적 쉽게 나타낼 수 있다. 앞서 산출된 기후시나리오를 토대로 기후대의 변화를 2011년부터 20년 평균값으로 2090년까지 분석한 결과 A(열대)기후와 B(건조)기후는 꾸준히 증가하고, C(온대)기후, D(냉대)기후, E(한대)기후는 감소하는 것으로 분석되었다(Table 4). 특히, A기후가 가장 큰 증가

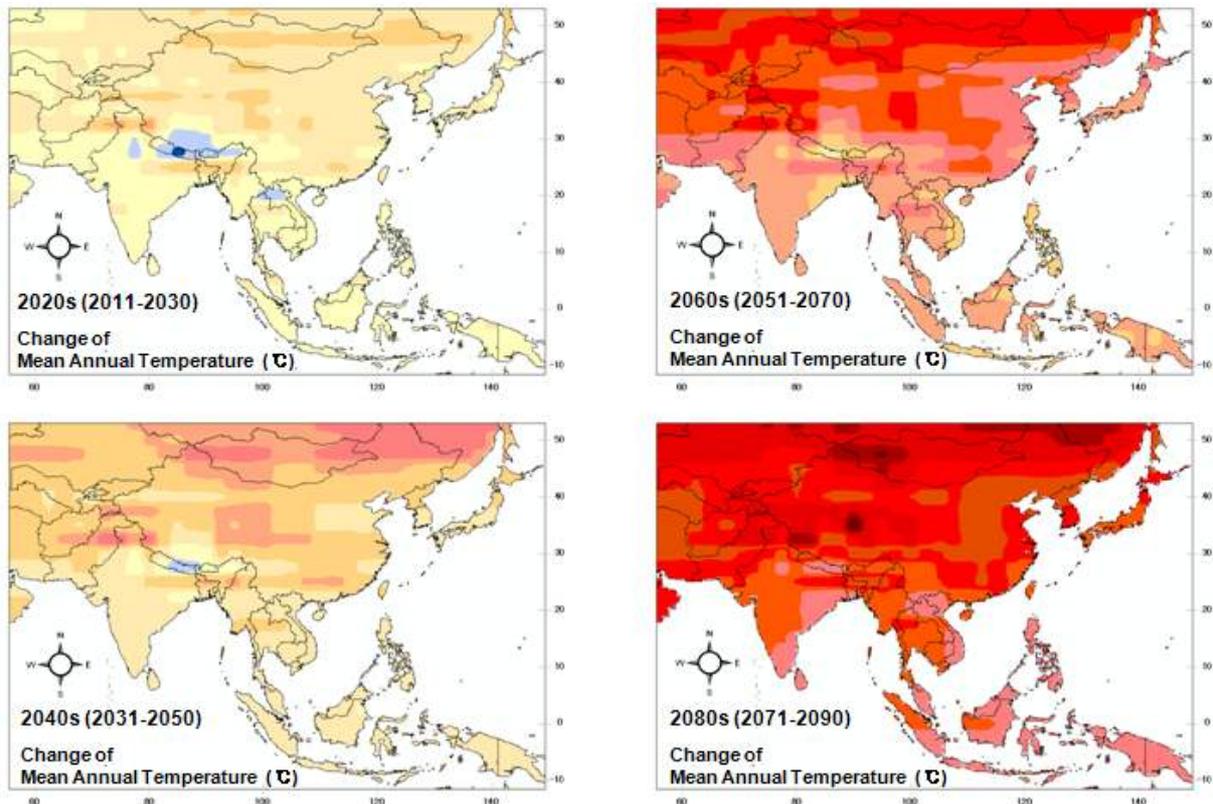


Fig. 4. Change of Mean Annual Temperature

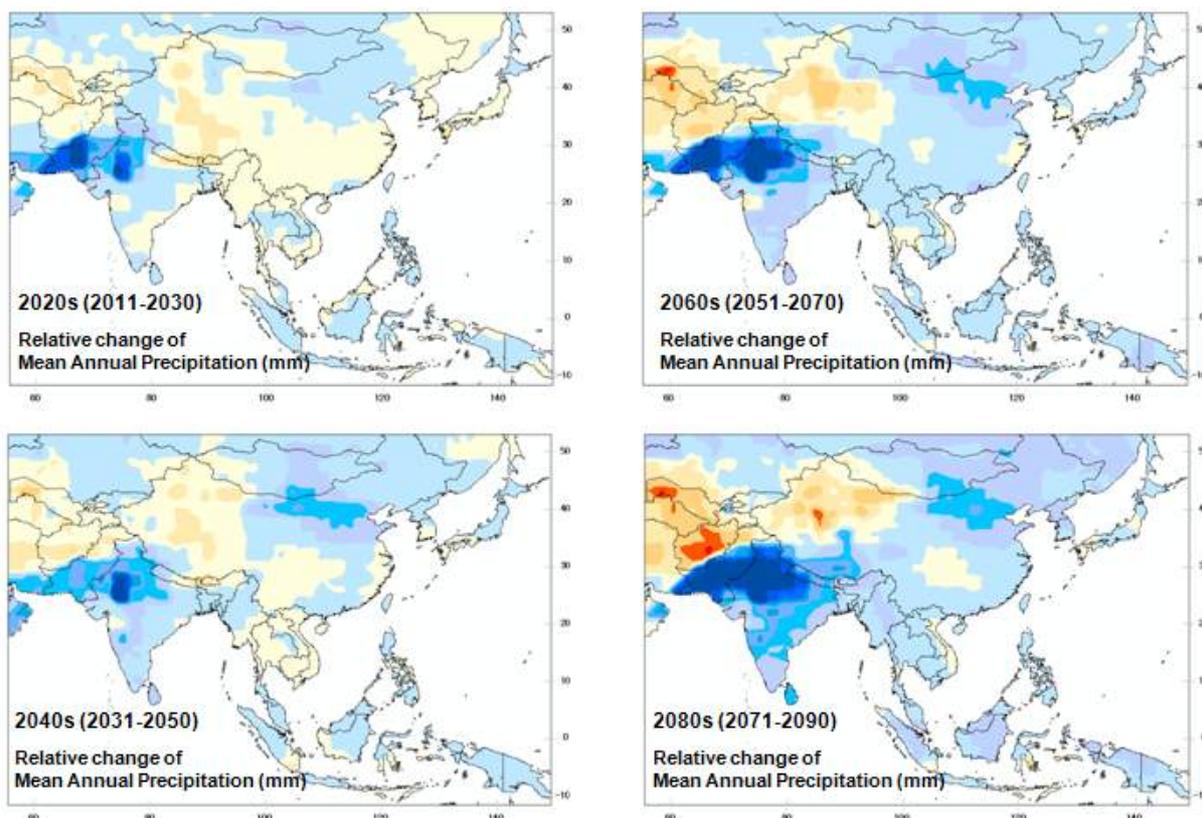


Fig. 5. Change of Mean Annual Precipitation

Table 3. Change of Relative Area Occupied by the Main Köppen Types

Köppen Climate types	Period								
	Base	2020s		2040s		2060s		2080s	
		Relative area	Change rate(%)						
A	17.96	20.33	2.37	19.87	1.91	23.04	5.08	25.16	7.20
B	32.15	31.41	-0.74	32.71	0.56	32.02	-0.13	34.08	1.94
C	21.09	20.79	-0.31	20.10	-0.99	20.21	-0.88	18.69	-2.41
D	26.90	25.46	-1.44	25.48	-1.42	24.16	-2.74	21.98	-4.92
E	1.90	2.02	0.12	1.85	-0.05	0.57	-1.33	0.09	-1.81

율을 보였는데 이는 지구온난화에 따른 기온상승의 영향으로 보여진다. B기후는 21세기 초반에는 32.15%에서 증가와 감소를 반복했지만 2080s 기간에는 34.08%까지 증가하는 것으로 전망되었다. C, D기후는 기준기간에 각각 21.09%, 26.90% 차지하였지만 21세기 말에는 18.69%, 21.98%까지 감소하는 것으로 나타났다. E기후는 2020s 기간까지 0.12% 증가하였으나 이후에는 0.09%까지 줄어든 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 2040s기간과 2080s기간의 쾨펜 기후대 분포를

나타낸 것으로 기준기간 기후대에 비해 인도지역의 Aw (열대습윤건조)기후대가 북쪽으로 확장될 것으로 전망되었다. 앞서 분석된 강수와 기온의 변동성과 비교해보면 이 지역의 연평균기온과 강수가 증가한 것을 알 수 있다. 또한, 몽골의 고비사막 부근의 경우 BW(사막)기후대 경계 또한 북쪽으로 확장되는 것으로 나타났는데 이 지역의 연평균 기온이 최대 2.5℃까지 증가한 영향인 것으로 판단된다. 2080s기간에는 인도지역의 Aw기후대가 파키스탄 지역까지 확장되고, 중국 광둥성 지역의 홍콩은 Am

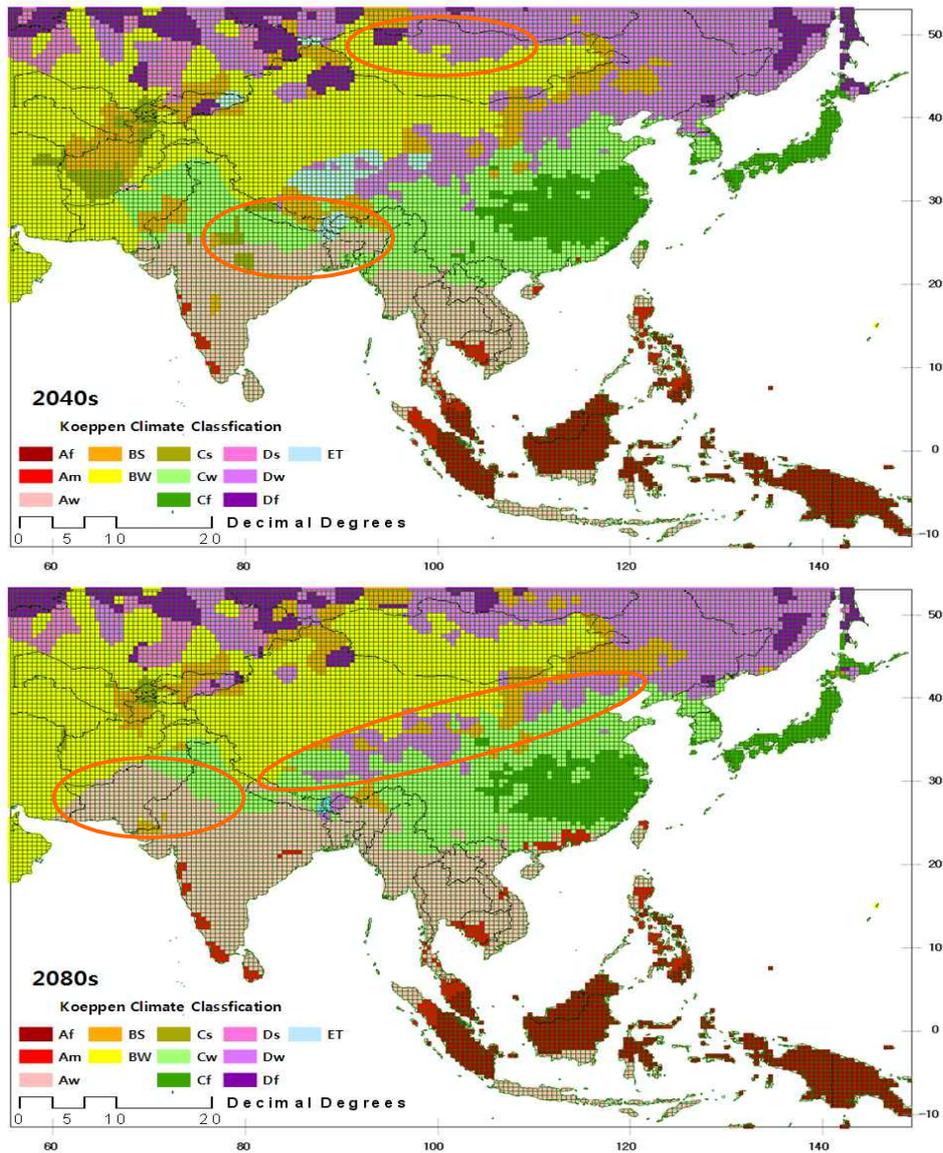


Fig. 6. The Spatial Distribution of Köppen Climate Classification at Each Period Under A2 Scenario

(열대몬순)기후가 나타날 것으로 전망되었다. 또한 히말라야 산맥 지역에 분포되어있던 ET(툰드라)기후는 Cw(온대하우)기후로, 사막 근처에 분포해 있던 BS(스텝)기후의 일부는 BW(사막)기후로 바뀔 것으로 분석되었다. 한반도의 경우 Cw기후가 북위 40°까지 북상할 것으로 전망되었으며, 일본의 경우 Df(냉대습윤)기후가 나타났던 홋카이도 지방이 Cf(아열대습윤)기후로 변화될 것으로 분석되었다.

특정 기후대의 증가나 감소가 어떤 기후대와 밀접한 관련이 있는지 알아보기 위해 기준기간부터 2040s, 2080s동안 5가지 대(大) 기후대 면적의 상호변화를 분석하였다 (Fig. 7). 각 기후대 위의 숫자는 기준기간의 면적비율을

아래의 숫자는 분석기간의 면적비율을 나타내며, 가운데는 증감률을 의미한다. 2040s 기간에는 A기후대는 1.91%, B기후대는 0.56% 증가하였고 나머지 C, D, E 기후대는 각각 -0.99%, -1.42%, -0.05% 감소하였다. 특히, B기후대의 경우 공간적 분포 특성상 모든 기후대와 인접해 있어 타 기후대 면적 변화에 모두 영향을 미치는 것으로 나타났다. A기후대의 증가에 있어 C기후대가 1.88%로 가장 크게 기여한 것으로 분석되었는데 이는 동남아시아와 남아시아에 분포해 있던 A기후대가 C기후대 영역으로 확장한 것에 기인한 것으로 판단된다. 2080s기간에는 2040s기간과 동일하게 기후대가 이동하면서 증감률은 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. A기후대의 경우 7.20%로 가장 큰 증가율을 보

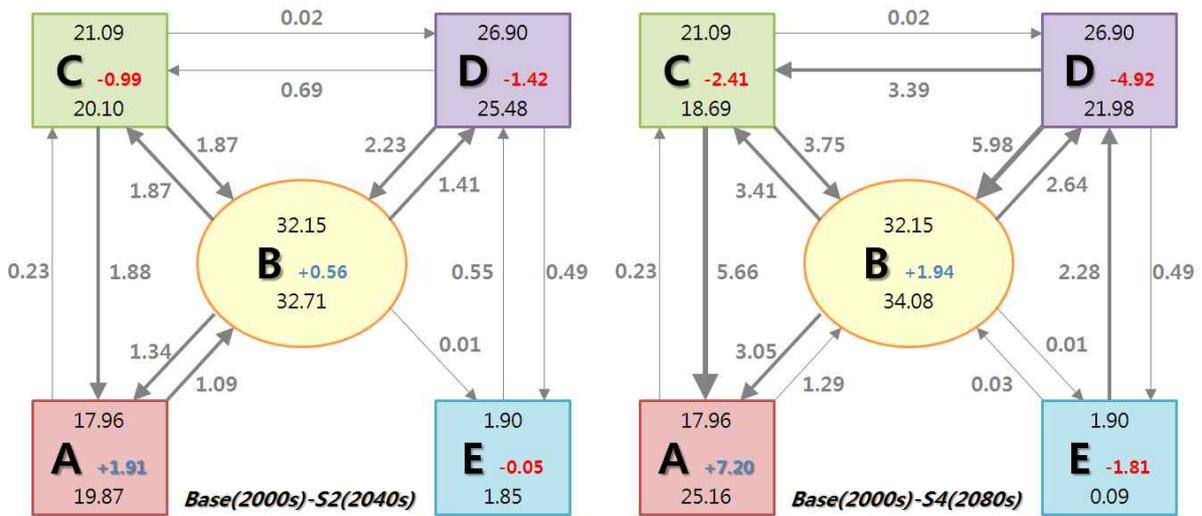


Fig. 7. Shifts Between Main Köppen Climate Classes for the Selected Periods

였으며, B기후대는 1.94% 증가하는 것으로 나타났다. 반면 C, D, E 기후대는 지속적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 종합해보면 열대기후대(A) 및 건조기후대(B)는 21세기동안 증가하였지만, 온대기후대(C), 냉대기후대(D), 한대기후대(E)는 감소하였다. 일반적으로 건조기후대(B)와 같이 강수량이 적은 지역에서는 기후변화에 따른 강수량의 변화가 식생 성장에 영향을 미치지만, 그 외의 열대기후대(A), 온대기후대(C), 냉대기후대(D), 한대기후대(E)는 기온이 식생 성장에 주요 인자가 된다. 이러한 기후대 분포의 변화는 기후변화에 따른 기온상승과 수문순환 패턴의 변화 영향이라 사료된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 기후변화에 따른 수문순환의 변화를 전망하기 위해 아시아 지역의 관측 기상자료 및 기후시나리오를 구축하고 강수 및 기온의 시공간적 변동성과 이에 따른 식생의 변화를 쾨펜의 기후대 구분법을 이용하여 분석하였다. 현재의 기후대 구분을 위해 NCDC에서 제공하는 기상자료를 수집하고 결측자료를 보정한 후 역거리 가중법을 이용하여 0.5°×0.5° 해상도로 격자화하였다. 구축된 기온과 강수량 자료를 이용하여 현재의 기후대의 분포를 분석하였다. 또한 미래의 기후대를 전망하기 위해 IPCC SRES에서 제공하고 있는 A2시나리오를 선정하였으며, ECHO-G 결과에 Delta method를 적용하여 관측자료와 동일한 해상도의 기후시나리오를 생산하였다. 본 연구에서 구축된 자료들을 이용하여 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 쾨펜의 기후 구분법을 이용하여 현재의 기후대 분포를 분석한 결과 각 아시아 국가의 기후를 잘 묘사하는 것으로 나타났으며, 특히 한반도의 경우 북쪽에는 Dw(냉대동계소우)기후, 해안지방에는 Cf(아열대습윤)기후, 내륙지방에는 Cw(온대하우)기후가 분포하는 것으로 분석되었다.
- 2) A2 온실가스배출시나리오 상황에서의 기후의 변동성을 평가한 결과 2080년경에는 기준기간에 비해 강수량은 12.02%, 기온은 3.99°C 증가할 것으로 전망되었다. 공간적으로는 기온의 경우 모든 기간에서 고위도 지역이 저위도 지역보다 기온상승폭이 크게 나타났으며 강수량은 모든 기간에서 평균적으로 증가하나, 지역적 편중이 더 심화될 것으로 전망되었다. 이러한 기온과 강수량의 패턴 변화는 안정적인 수자원 관리의 어려움을 가중시킬 것으로 판단된다.
- 3) 기후시나리오를 이용하여 미래 기후대를 전망한 결과 대체로 따뜻한 기후대의 면적은 증가한 반면, 찬 기후대의 면적은 감소하는 것으로 분석되었다. 기준기간 대비 2080년경에는 열대 기후대(A)의 경우 7.2%, 건조 기후대(B)는 1.9% 증가하였으며 온대 기후대(C), 냉대 기후대(D), 한대 기후대(E)는 각각 -2.4%, -4.9%, -1.8% 감소하였다. 이러한 결과는 기후변화에 따른 기온의 증가, 사막화의 영향에 기인한 것으로 사료된다.

본 연구에서는 광범위한 아시아 지역의 관측 기상자료를 수집하고, 기후시나리오를 생산하였다는 측면과 기후변화에 따른 수문순환의 영향을 강수·기온·식생의 상호관계를 이용하여 분석하였다는 측면에서 가치가 있다고 판

단된다. 그러나 본 연구결과는 하나의 가상 시나리오 상황에 대한 전망으로 불확실성을 내포하고 있다. 첫째는 수집 가능한 관측 기상자료의 한계로 가용한 관측소의 밀도가 낮다는 점과 장기간의 신뢰성 있는 자료가 부족한 점이다. 둘째는 온실가스배출시나리오 선정, GCM 종류와 해상도, Delta method의 한계 등에서 기인한다. 우선 관측 자료의 한계로 인한 불확실성을 줄이기 위해서는 각 국가별 지속적인 협력을 통하여 양질의 관측 자료를 확보하는데 많은 노력을 기울여야 할 것이다. 온실가스배출시나리오 선정의 경우 모든 사회, 경제, 기술, 환경적 부분을 완벽하게 배출시나리오에 고려하는 것은 불가능하기 때문에 다양한 시나리오 상황에 대한 평가가 필요하며 연구 목적에 적합한 시나리오를 선정해야 한다. 기후모델에 따른 불확실성을 줄이기 위해서는 현재의 기후를 물리적으로 잘 모사할 수 있는 GCM을 선정하는 것이 필요하다. 또한, Delta method의 경우 기후의 비정상성 변화는 고려하지 못한다는 단점이 있기 때문에 다양한 상세화 기법의 적용 및 평가 연구도 필요할 것이다. 최근에 국제사회는 2013~2014년 발간 예정인 IPCC 제5차 기후변화 평가보고서를 위하여 표준 온실가스시나리오를 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)로 새롭게 선정하고 고해상도의 GCM 모델을 이용하여 보다 개선된 기후시나리오를 산출하고 있다. 향후 아시아 지역의 물안보를 확보하기 위해 보다 신뢰성 높은 관측 자료와 기후시나리오 구축을 위한 노력과 더불어 수문모델링을 통한 수자원 영향평가 연구들이 지속되어야 할 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2012~3100)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아수행된 연구임(NO. 2011-0030839).

## REFERENCES

- Bae, D.H., and Jung, I.W. (2008). *Climate Change Impact Assessment Methods and Results in Korean Water Resources*. Technical Report, TR 2008-03, SWRRC (in Korean).
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008a). "Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins." *Hydrological Processes*, Vol. 22, pp. 2644-2656.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008b). "Potential changes in Korean water resources estimated by high-resolution climate simulation." *Climate Research*, Vol. 35, pp. 213-226.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Lee, B.J. (2007). "Outlook on Variation of Water Resources in Korea under SRES A2 Scenario." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korean Water Resources Association, Vol. 40, No. 12, pp. 921-930.
- Bae, D.H., Jung, I.W., Lee, B.J., and Lee, M.H. (2011). "Future Korean Water Resources Projection Considering Uncertainty of GCMs and Hydrological Models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korean Water Resources Association, Vol. 44, No. 5, pp. 389-406.
- Beck, C., Grieser, J., Kottek, M., Rubel, F., and Rudolf, B. (2005). "Characterizing Global Climate Change by means of Köppen Climate Classification." *Klimastatusbericht*, pp. 139-149.
- Chung, I.U., and Shin, S.H. (2011). "Observed Change of Climatic Regions and Desertification during the 20th Century." *Climate Research (in Korean)*, Konkuk University Climate Research Institute, Vol. 6, No. 1, pp. 23-44.
- Choi, Y. (2002). "Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern region of Korea." *Korea Soc. Environmental Impact Assessment*, Vol. 76, pp. 189-203.
- Elsner, M.M., Cuo, L., Voisin, N., Deems, J.S., Hamlet, A.F., Vano, J.A., Mickelson, K.E.B., Lee, S.Y., and Lettenmaier, D.P. (2010). "Implications of 21st century climate change for the hydrology of Washington State." *Climatic Change*, Vol. 102, pp. 225-260.
- FEU-US (2011). *The Impacts of Climate Change on Food Production: A 2020 Perspective*.
- Fraedrich, K., Gerstengarbe, F.W., and Werner, P.C. (2001). "Climate shifts in the last century." *Climatic Change*, Vol. 50, pp. 405-417.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S., and Tebaldi, C. (2007). "Linking climate change modelling to impact studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling." *International Journal of Climatology*, Vol.

- 27, pp. 1547-1578.
- IPCC (2007). *Climate change 2007: The Scientific Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jung, I.W., Bae, D.H., and Im, E.S. (2007). "Generation of High Resolution Scenarios for Climate Change Impacts on Water Resources (II): Runoff Scenarios on Each Sub-basins." *Journal of Korea Water Resources Association*, Korean Water Resources Association, Vol. 40, No. 3, pp. 205-214.
- Jung, I.W., Bae, D.H., and Kim, G. (2010). "Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea." *International Journal of Climatology*, Vol. 31, No. 3, pp. 359-370.
- Kalvova, J., Halenka, T., Bezpalcova, K., and Nemesova, I. (2002). "Köppen climatic types in observed and simulated climates." *Stud. Geophys. Geod.*, Vol. 47, pp. 185-202.
- Kim, M.J., Shin, J.H., Lee, H.S., and Kwon, W.T. (2008). "An Uncertainty Assessment of AOGCM and Future Projection over East Asia." *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 507-524.
- Kim, Y.O., Seo, Y.W., Lee, D.R., and Yoo, C. (2005). "Potential effects of global warming on a water resources system in Korea." *Water International*, Vol. 30, No. 3, pp. 400-405.
- Kim, B.S., Kim, H.S., and Seoh, B.H. (2007). "Impact of climate change on water resources in Yongdam Dam Basin, Korea." *Stoch Environ Res Ris Assess*, Vol. 21, pp. 355-373.
- Kwon, Y.A., Kwon, W.T., Boo, K.O., and Choi, Y.E. (2007). "Future Projections on Subtropical Climate Regions over South Korea Using SRES A1B Data." *Journal of Korean Geographical Society*, Korean Geographical Society, Vol. 42, No. 3, pp. 355-367.
- Liu, Z., Xu, Z., Huang, J., Charles, S.P., and Fu, G. (2010). "Impacts of climate change on hydrological processes in the headwater catchment of the Tarim River basin, China." *Hydrological Processes*, Vol. 24, pp. 196-208.
- Semenov, M.A., and Barrow, E.M. (2002). *A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies: User Manual*.
- Snover, A.K., Hamlet, A.F., and Lettenmaier, D.P. (2003). "Climate change scenarios for water planning studies: pilot applications in the Pacific Northwest." *Bull Am Meteorol Soc*, Vol. 84, No. 11, pp. 1513-1518.
- Son, K.H. (2010). *Assessment of Global Hydrologic Model on East Asia Region*. M.Sc. thesis, Sejong University, Seoul, Korea.
- Wang, M., and Overland, J.E., (2004). "Detecting arctic climate change using Köppen climate classification." *Climatic Change*, Vol. 67, pp. 43-62.

논문번호: 12-105	접수: 2012.09.11
수정일자: 2012.10.10/10.31	심사완료: 2012.10.31