

July, 2015

# **Impact of Climate Change on the Regional Summer Monsoon**

**Doyeon Kim**

Summer Research Program, Climate Change Laboratory, Prof. Seung-ki Min

## **Abstract**

Regional variations in summer monsoon rainfall for the period 1986-2100 are studied by using 35 climate models in CIMIP5(Coupled Model Intercomparison Project phase5). This paper focused on seven separate monsoon regions: North America (NAM), South America(SAM), North Africa(NAF), South Africa(SAF), East Asia(EAS), South Asia(SAS), and Australia(AUSMC). Under RCP4.5 scenarios, the global temperature and the contrast in precipitation between wet and dry regions have increased. Also, the global monsoon precipitation and the surface temperature have increased in general. Particularly, changes in Asian monsoon domain are larger than other monsoon region in our data. Furthermore, the results shows increased precipitation in the monsoon regions is associated with its surface temperature; however, each models' results have slight difference. Therefore, this study elucidates that the future climate change will impact on monsoon regions.

## 1. Introduction

몬순은 태양열에 의한 육지와 해양의 비열 차로 인해 여름과 겨울에 풍향이 정반대가 되는 바람이 광범위한 지역에 걸쳐 부는 것을 말한다 (Webster and coauthors, 1998). 특히 여름 몬순은 경년(inter-annual) 및 계절안(intra-seasonal) 변동이 커서 심한 가뭄과 홍수와 같은 이상 기상을 발생 시키며 그 결과 많은 인명과 경제적 피해를 초래하고 있다 (Lau, 1992). 최근 기후변화정부간협의체(Intergovernmental Panels on Climate Change) 제 5차 보고서에 따르면 지구 온난화로인해 기온이 꾸준히 상승할 것으로 예상하며, 이는 대기의 수분함량을 증가 시켜 몬순 강수량이 더 강해 질 가능성이 높다고 전망하였다.

이에 본 연구는 RCP4.5 시나리오에 의한 1986년에서 2100년까지의 전지구적 기온변화 패턴과 강수량패턴을 분석한 후, 특히 7개의 지역(NAM, SAM, NAF, SAF, EAS, SAS, AUSMC)의 여름몬순에 집중하여 분석하였다. 이러한 몬순 지역은 대부분 적도, 북서태평양, 북동태평양, 그리고 남 인도양에 걸쳐있다. 이 중 아메리카 몬순은 계절에 따른 방향이 반대가 되는 지역은 아니지만, 강수량과 상대습도, 대기 순환에 있어서 계절에 따른 큰 변화가 있기 때문에 몬순 지역으로 포함시켰다. 분석은 몬순 지역에서 지구온난화에 따른 변화가 나타나는지, 몬순지역의 온도와 강수량은 서로 어떠한 관계를 가지는지를 중심으로 조사하였다. 2절에서는 본 연구에서 사용한 CIMIP5 모델을 간단히 소개하였고, 3절과 4절에서는 CMIP5에서 나타난 전지구적 기후변화와 몬순지역의 변화 특징에 대하여 설명하였다. 마지막으로 5절에

서는 본 연구에서 얻은 결론을 제시하였다.

## 2. Method and data analysis

본 연구에서 사용한 자료는 크게 3가지로 전지구의 강수량과 온도 변화를 예상하기 위해 RCP4.5시나리오를 적용한 CIMIP5의 전 지구적 온도, 강수 자료와 특정 몬순지역을 분석하기 위한 마스크 자료이다.

### 2.1 CMIP5 models

CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase5)는 여러 개의 Global Climate Model을 비교 분석하여 결과를 도출해 낸다. 다음은 본 연구에서 사용된 CMIP5 모델 목록이다

| Models(35)     |
|----------------|
| NorESM1-ME     |
| NorESM1-M      |
| MRI-CGCM3      |
| MPI-ESM-MR     |
| MPI-ESM-LR     |
| MIROC-ESM-CHEM |
| MIROC-ESM      |
| MIROC5         |
| IPSL-CM5B-LR   |
| IPSL-CM5A-MR   |
| IPSL-CM5A-LR   |
| inmcm4         |
| HadGEM2-ES     |
| GISS-E2-R-CC   |
| GISS-E2-R      |
| GISS-E2-H-CC   |
| GISS-E2-H      |
| GFDL-ESM2G     |
| FIO-ESM        |
| CSIRO-Mk3-6-0  |
| CMCC-CMS       |
| CMCC-CM        |
| CESM1-CAM5     |
| CESM1-BGC      |
| CCSM4          |
| CanESM2        |
| BNU-ESM        |

|              |
|--------------|
| bcc-csm1-1-m |
| ACCESS1-3    |
| ACCESS1-0    |
| GFDL-ESM2M   |
| GFDL-CM3     |
| EC-EARTH     |
| bcc-csm1-1   |
| FGOALS-g2    |

대부분의 결과는 과거자료(1986-2005)와 RCP4.5(2080-2099)의 기준을 이용하였다. 몬순 관련 자료에서는 여름몬순을 분석하기 위해 여름(북반구의 경우 5월에서 9월, 남반구의 경우 11월에서 3월)을 기준으로 계산하고 월별자료(Monthly Data)를 사용하였다.

### 2.1.1 Temperature

RCP4.5시나리오 하에서, 2016-2035년과 2081-2100년 기간에 대한 연평균 지표기온 변화(기준 기간 1986-2005)의 다중모델 앙상블 평균을 이용하여 구한다. 시계열의 경우 전 지역 평균으로 과거 관측자료(1986-2005)에 기반한 모델 자료와 전망(2005-2100)으로 나타나낸다.

### 2.1.2 Precipitation

강수에 대한 모의는 온도에 비해 견고하지 않으므로 평준화를 이용하여 계산한다. 강수 비율 변화의 패턴들은 21세기 마지막 20년에 대한 실험(2016-2035년, 2081-2100년)과 과거 20년에 대한 실험(1986-2005년) 간의 평균 차이를 고려하고, 대응하는 전 지구 평균온도 변화에 의해 각각의 차이를 결정 하여 계산한다. 이러한 계산은 우선 각 개별 모델에 대해 수행되며,

모델 전반에 걸쳐 결과가 평균화된다

## 2.2 Regional land monsoon domain

Akio Kitoh에 의해 정의된 몬순 도메인은 연간평균강수량이  $2.5\text{mm}^{-1}$  을 넘는 지역을 기준으로 정하였다 (Akio, 2012). 전 지역 몬순 (GLB), 북아메리카(NAMS), 북아프리카(NAF), 남아시아(SAS), 동아시아(EAS), 오스트레일리아-해양 대륙(AUSMC), 남아프리카(SAF), 남아메리카(SAMS) 총 7개의 지역을 마스크 자료를 통해 비교 분석한다(그림 4 참고). 이때 나타난 결과의 박스와 수염도는 10, 25, 50, 75, 90 퍼센타일(%)을 나타낸다

## 3. Changes of precipitation and surface temperature with global warming

CIMIP5에 의해 전망된 전 지구 평균지표 온도변화는 1986-2005년을 기준으로 2080-2100년의 전 지구 평균지표 온도상승은 CIMIP5 기후 모델에서 도출된 범위  $1.1\sim 2.6^{\circ}\text{C}$  (RCP4.5)내에 들것으로 전망되었다(그림 2). 이때에 육지의 평균온난화는 해양보다 클 것이다. 따라서 이러한 지구의 온난화는 육지의 온도를 높이고, 이는 증발량을 증가시켜 육지건조화를 더욱 심화시킬 것이다(그림 1). 또한 해양의 공기는 더욱 습윤해져서 연안에 비를 더 많이 내리게 될 것이다.

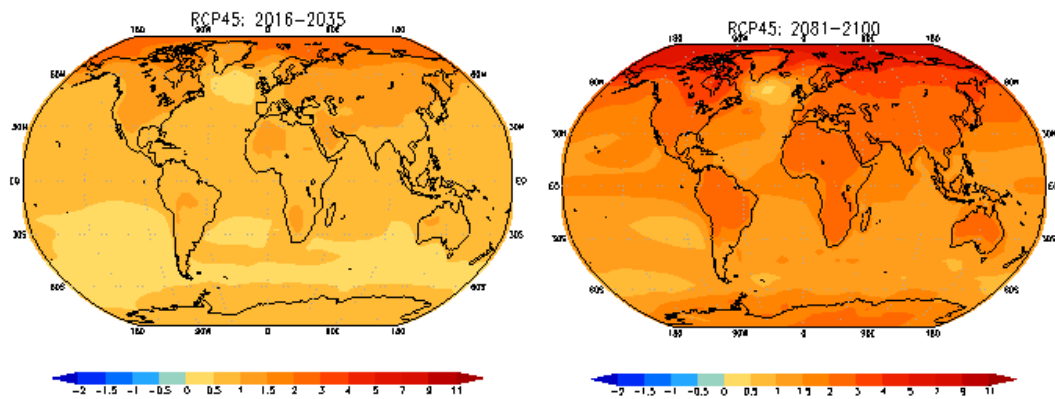


그림 1 RCP4.5시나리오 하에서, 2016-2035년과 2081-2100년 기간에 대한 연평균 지표기온 변화(기준 기간 1986-2005)의 다중모델 앙상블 평균

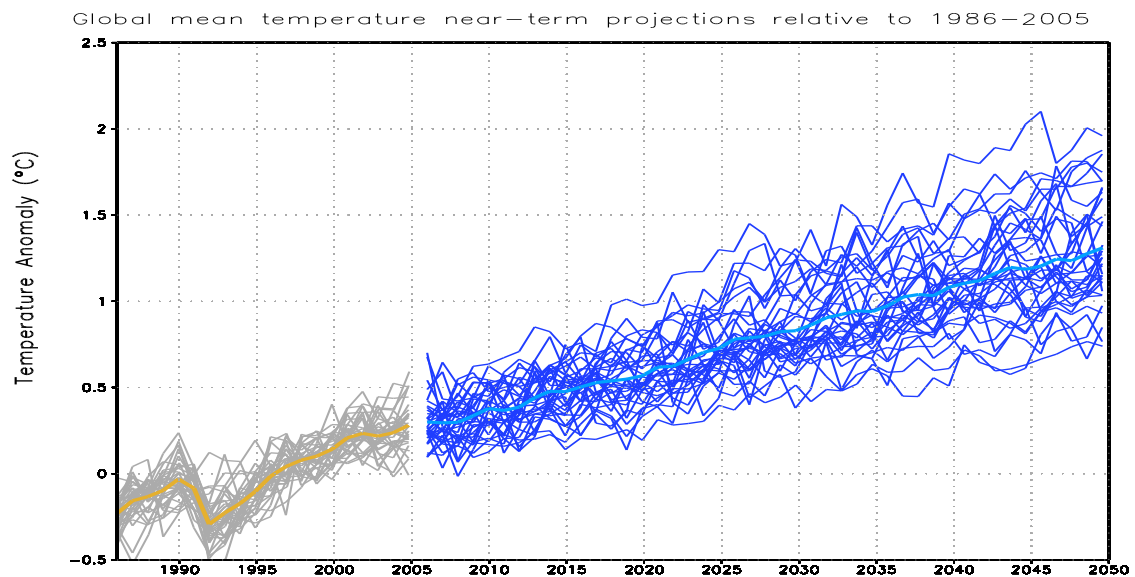


그림 2 단기기간의 전 지구평균 지표기온 (GMST)전망. CMIP5 모델 기반, 4.5 RCP 하에서의 GMST 1986-2050년의 연평균 GMST 전망(1986-2005년 기준 편차)(회색 및 색깔로 표시된 선, 모델 당 한 개 앙상블 멤버)과 1986-2012년에 관측 추정치(HadCRUT4) (회색). 2006-2050년의 각 모델의 전망 값(파란색)

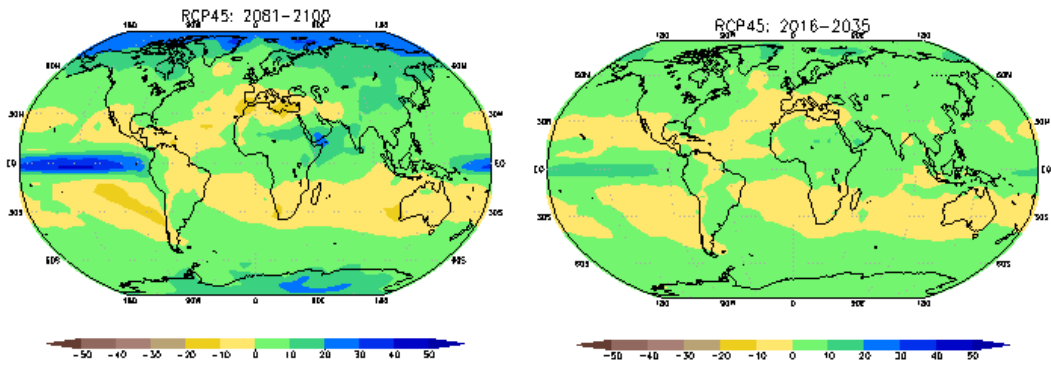


그림 3 RCP4.5시나리오 하에서, 2016-2035년과 2081-2100년 기간에 대한 연평균 강수 비율(%) 변화(기준 기간 1986-2005)의 다중모델 앙상블 평균

이러한 대기의 물 순환(Water Cycle)의 변화는 일정하지 않을 것이라고 예상되고 있으나 건조한 지역과 습윤한 지역, 습윤하고 건조한 계절 사이의 강수량의 차이가 크게 날 것이라고 전망된다. 그림 3에 의하면 21세기 말까지 고위도와 적도 태평양에서 연평균 강수량이 증가하게 될 가능성이 높다. 또한 많은 중위도와 아열대 건조지역 같은 경우에는 평균강수량이 감소할 가능성이 높지만, 대부분의 습윤한 중위도지역에서는 평균강수량이 증가할 가능성이 높다(IPCC, 2007). 따라서 다음 장에서 여름철 강수에 대부분을 차지하고 있는 여름 몬순에 대해 집중적으로 분석하고자 한다.

#### 4.1 Regional Aspects of Future Monsoon Precipitation Changes

그림 5 결과에 따르면 전체적인 몬순 강수는 증가하는 경향을 보이지만, 지역적인 몬순 강수는 차이를 보이고 있다. 따라서 7개의 몬순 지역으로 나누어서 살펴보았다(몬순 전 지역

(GLB), 북아메리카(NAMS), 북아프리카(NAF), 남아시아(SAS), 동아시아(EAS), 오스트레일리아-해양 대륙(AUSMC), 남아프리카(SAF), 남아메리카(SAMS), 그림 4 참고).

그림 5의 (a)와 (b)는 CIMIP5모델들의 현재기 후기준으로 평균 지역별 강수량 변화 비율(%)과 연간 계절강수 변동성의 표준편차(%)을 나타내었다. 전지구적으로(GLB) 50%이상의 모델들이 몬순 강수가 증가할 것으로 모의하는 것을 볼 수 있다. 또한 Psd값도 증가할 것이라고 전망한다. NAMS지역에서는 평균 강수가 줄어드는 것으로 모의하고 있고, Psd는 중간 값을 가진다 하지만 모델간의 격차가 큼을 확인할 수 있다. SAMS지역에서는 Psd의 평균이 약간 증가하지만, 2/3모델이 모두 증가하는 것으로 모의한다. 아프리카지역인 NAF와 SAF지역은 중간 정도의 증가를 보인다.

Regional land monsoon domain<sup>4)</sup>

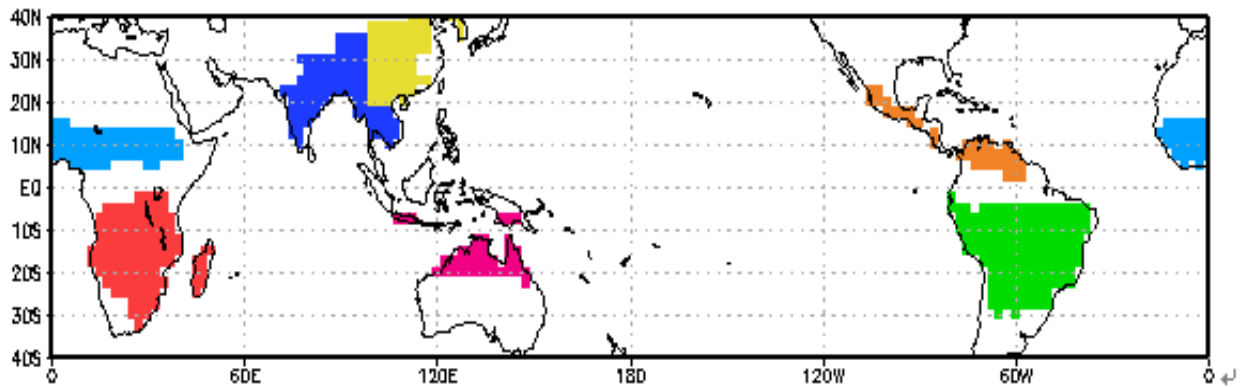
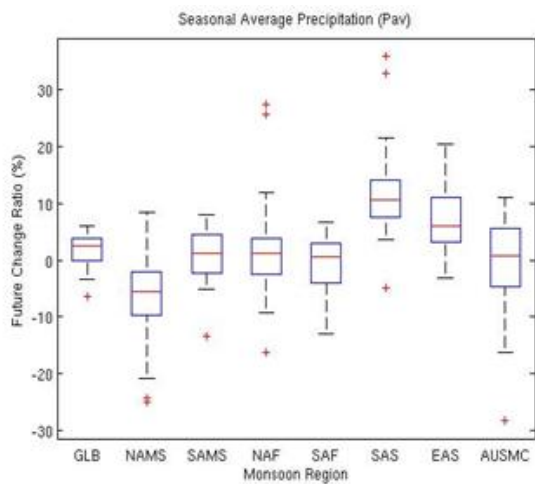
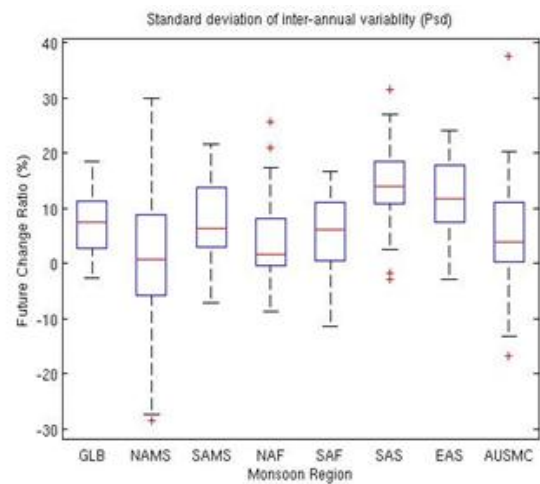


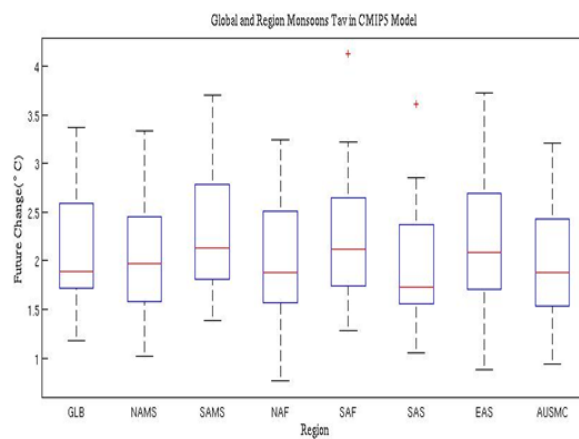
그림 4 색깔이 있는 지역은 몬순의 도메인을 나타낸다. NAMS(주황색), NAF(하늘색), SAS(파란색), EAS(노란색), AUSMC(분홍색), SAF(빨간색), SAMS(초록색)



(a)



(b)



(c)

그림 5 RCP4.5하의 CMIP5앙상블에 기반한 현재(1986-2005년) 와 미래(20802099년)의 몬순 통계의 미래전망. 전 지구 몬순지역(GLB), 북아메리카(NAMS), 북아프리카(NAF), 남아시아(SAS), 동아시아

아(EAS), 오스트레일리아-해양 대륙(AUSMC), 남아프리카(SAF), 남아메리카(SAMS)에서의 (a) : 연간 몬순강수 평균 Pav(Seasonal Average Precipitation), (b) : 연간 계절강수 변동성의 표준편차(Psd)를 나타낸다. 단위는 모두 %다. 박스와 수염도는 10, 25, 50, 75, 90 퍼센타일을 나타낸다. 모든 지수는 각 모델의 몬순 영역에 대해 여름(북반구의 경우 5월에서 9 월, 남반구의 경우 11월에서 3월)을 기준으로 계산하였다. (c)는 연간 몬순지역의 지표온도 증가를 나타낸다. (단위 °C)

특히 아시아몬순지역(SAS,EAS)의 뚜렷한 강수량 증가변화를 확인 할 수 있다. 또한 Psd도 크게 증가함을 확인 할 수 있다. 이는 아시아 몬순지역이 지구온난화에 의한 반응성이 높고, 향후 강수량의 증가와 극한 기후에 노출될 위험성이 커짐을 알려준다. 마지막으로 AUSM지역은 평균과 편차 모두가 약간 증가하는 경향을 보인다.

지표온도에 대해 지역별 특징을 보자면(그림 4-c), 몬순 지역에서 전체적으로 1~2.5°C 가량 모두 상승하는 것으로 확인된다. 여러 지역에서 모델 별 격차가 크지만, 모든 모델에서 온도 상승을 모의 했다. 특히 SAF, EAS지역의 온도상승이 두드러진다.

## 4.2 Relationship in monsoon between precipitation and surface temperature

몬순은 기본적으로 비열에 의한 계절풍과 연관되기 때문에 온도상승과 관련성이 있을 수 있다. 하지만 지역별 몬순강수는 지역적 특성에 의한 변동이 크게 나타나기 때문에 전 지구 몬순 강수와 지표온도를 비교해 보았다. 그림 6은 35개의 모델이 기준기간(1986-2005년)에 대

한 2005년~2100년의 평균적인 강수와 지표온도 변화를 어떻게 모의 하는 지를 알려준다. 대체적으로 기온을 높게 모의하는 모델은 강수를 낮게 모의하고, 강수를 높게 모의하는 모델은 반대로 기온은 낮게 모의하는 음의 상관관계를 가짐을 확인 할 수 있다.

몬순지역의 온도와 강수 사이의 단순한 상관관계는 오르고 내리는 패턴이 거의 비슷하므로 0.92정도의 높은 상관계수를 가진다. 이때, 몬순지역의 온도와 강수 사이의 관계를 알아보기 위해 기준기간(1986-2005년)에 대한 2005년-2100년의 연간 강수량변화와 온도 변화의 시계열에 따른 관계를 구해 보았다(그림 7). 35개의 모델들은 각각 조금씩 차이를 보이지만 모두 양의 관계를 가지는 추세를 보인다. 따라서 몬순지역에서 온도가 올라가는 것이 강수증가와 관계가 있다고 말할 수 있지만, 기울기 값이 작고, 증가 폭의 시간차가 있기 때문에 뚜렷하게 나오지는 않는다.

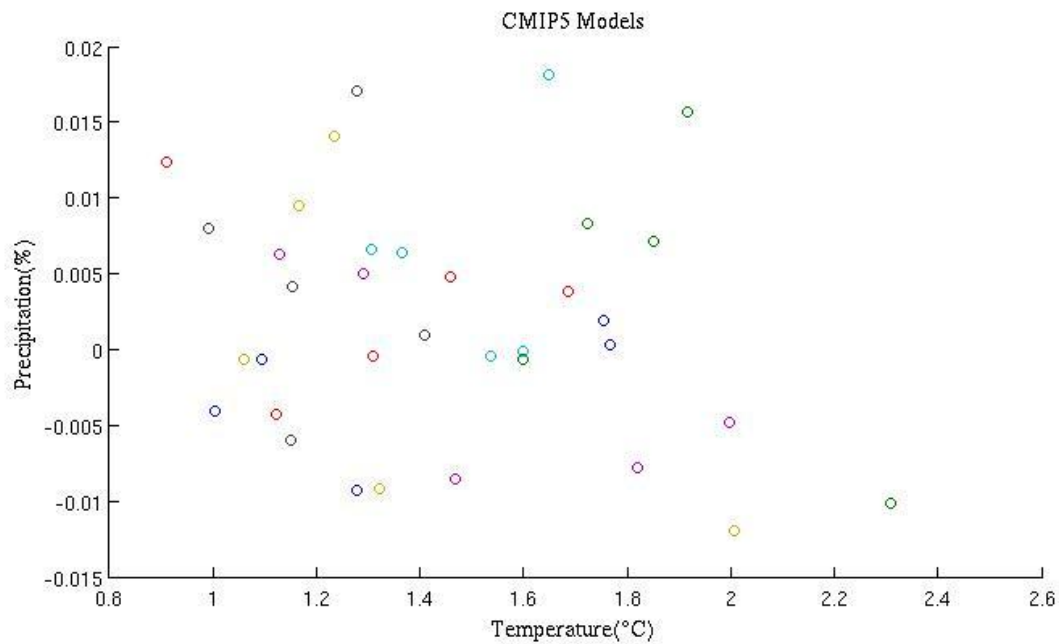


그림 6 CMIP5의 35개의 모델의 2005년-2100년 기간에 대한 평균강수변화와 평균지표온도 변화를 나타낸 그래프이다(기준 기간 1986-2005). 각 점은 모델을 나타낸다.

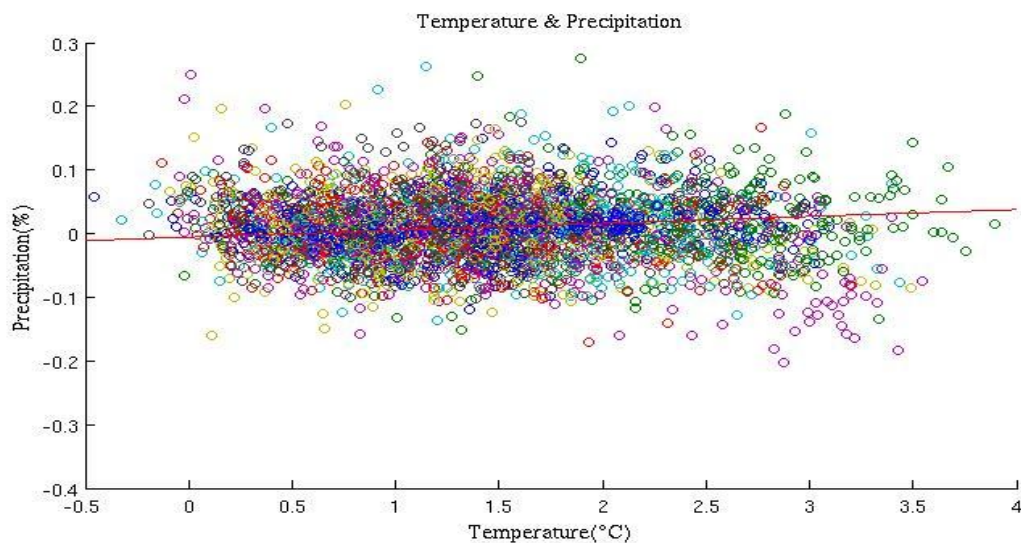


그림 7 2005-2100년 기간에 대한 각 모델에 시간에 따른 온도변화(°C)와 강수량변화(%)를 함께 나타낸 그래프이다(기준 기간 1986-2005). 각 점들은 35개의 모델 값이며 추세 선은 모델의 평균적인 결과를 나타낸다.

## 5. Discussions and Summary

CMIP5에 의한 미래기후 전망은 RCP4.5하의 전지구적인 온도상승과 강수량의 변화를 전망

한다. 모델자료결과 평균 1.1~2.6°C 가량 상승할 것이며, 강수량의 패턴은 습윤한 지역과 건조한 지역의 격차가 더욱 심해질 것이다. 이러한 전지구적 온도상승과 물 순환 변화는 대기



중 수증기량을 증가시켜 몬순 지역에 특히 영향을 끼치게 된다. 본 연구에 따르면 전체 몬순지역의 평균강수량과 변동성은 지구온난화와 함께 증가 할 것이며, 특히 아시아지역의 변화량이 크다. 이것은 기상에 의한 자연재해의 위험이 커질 위험이 있으므로 이 지역의 몬순기후변화에 대한 대비가 반드시 필요하다. 마지막으로 몬순지역의 강수와 기온에 관한 비교 분석에서는 약한 양의 상관관계를 나타냈지만, 많은 변수들이 작용하므로 다양한 방식으로의 접근과 모델마다의 격차를 최소화하는 기술 개발에 집중하여 더 나은 연구가 필요하다.

## References

- IPCC. "IPCC Fifth Assessment Report (AR5)." *IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change*. N.p., 2007. Web. 28 July 2015.
- Lau KM (1992), *East Asian summer monsoon rainfall variability and climate teleconnection*. J Meteor Soc Japan 70: 211–241
- Webster, P. J, and Coauthors (1998), *Monsoons : processes, predictability, and the prospects for prediction*, J. Geophys. Res., 103,14451-14510.
- Akio Kitoh, and Hirokazu Endo (2012), *Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context*, J. Geophys. Res.