

## 복잡한 해안지역에서의 RCP 기후변화 시나리오 적용성 평가\*

### Applicability Evaluation of RCP Climate Change Scenarios in the Complex Coastal Regions

Hyo Seon Park\*\*, Gye Woon Choi\*\*\*\*

Department of Civil & Environmental Engineering, Incheon National University, Building 8A, 12-1  
Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

#### Abstract

RCP scenarios which are the prediction of the greenhouse gas concentration were applied in the IPCC Fifth Assessment Report(AR5) followed by SRES scenarios of IPCC Fourth Assessment Report. This research evaluates the applicability of daily precipitation by new RCP scenarios from KMA. The last 40 years observed precipitation data from Incheon weather station and Ganghwa weather station are also analyzed. Afterwards, climate change scenarios' of predicted precipitation data were compared with the observed precipitation data. In order to examine the characteristics of summer precipitation change, we compared last 40 years observed precipitation data and the future 40 years data which is measured from 2011 to 2050yr. Observed and simulated precipitation data at Ganghwa weather station show a similar increasing trend. Simulation data of Incheon weather station show lower simulated results in comparison with the current observed data. Also, in order to consider short-term maximum rainfall characteristics, we analyze annual maximum daily precipitation of RCP scenarios. Some predicted values are higher than the current value of the annual total precipitation data. In addition, sea and land boundaries present a complicated topology, so it is difficult to build climate change data and to apply utilization of resources. Therefore, Solutions to the uncertain boundary were presented in this study. And there need to be done changes by modifying some elements in order to avoid some of the future consequences and apply them in various water-related business which are willing to suggest the correct information.

**Key words:** climate change, RCP scenario, Incheon city, precipitation

\* 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C01)에 의해 수행되었음

\*\* Corresponding author. Tel. +82-32-835-4760. E-mail. kokomanara@hanmail.net

\*\*\* Tel. +82-32-835-8467. E-mail. gyewoon@incheon.ac.kr

Submission & Publication Process

Received: Jan. 14, 2014 / Revised: Feb. 7, 2014 / Accepted: Feb. 14, 2014

#### 국문초록

IPCC 5차 평가보고서에서는 4차 평가보고서의 SRES 시나리오에 이어 새로운 온실가스 농도 전망 기법인 RCP 시나리오를 도입하여 적용하고 있다. 이 연구에서는 기상청에서 제공하고 있는 새로운 RCP 시나리오에 의해 산출된 일강수량의 실제 적용 시 적용성을 평가하였으며 해안지역에 위치한 인천을 대상으로 하여 인천과 강화 기상관측소 지점의 최근 40년간 관측 자료와 기후변화 시나리오에 의한 예측자료의 강수량변화 특성을 비교하였다. 계절 중 강수량이 집중되는 여름철의 강수변화특성을 살펴보기 위하여 최근 40년간 여름철 관측 자료와 2011년부터 2050년까지 미래 40년간 여름철 예측자료를 비교한 결과, 강화지점의 경우 강수량 증가 추세가 관측 자료와 모의자료가 비교적 비슷한 경향을 보이거나 인천지역의 경우 현재의 관측치보다 과소모의 된 것으로 나타났다. 또한 단기간 최대강우 특성을 살펴보기 위하여 관측 및 RCP 시나리오의 연최대일강수량을 비교한 결과, RCP시나리오의 경우 일부 예측 값들이 현재의 연간 총 강수량보다도 높은 수치를 나타내는 이상강수가 나타났다. 이밖에도 지형이 복잡한 해안지역의 경우 바다와 육지의 경계가 불분명한 경우가 많아 기후변화 자료를 구축 및 활용하기가 쉽지 않음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 그에 따른 해결방법을 일부 제시하였으며 추후 이러한 불확실성 결과를 초래하는 요소들을 수정하여 각종 물관련 사업에 활용할 수 있는 정확한 정보를 구축해야 할 것이다.

**주제어:** 기후변화, RCP 시나리오, 인천광역시, 강수량

## 1. 서론

전 세계는 현재 기후변화 위기에 직면하였으며 이러한 위기에 대응하기 위하여 구조물적 또는 비구조물적 대책을 강구해야 한다. 기후변화는 21세기 인류가 직면한 중요한 환경 문제 중 하나로 지구의 평균기온은 계속적으로 상승할 것으로 전망되며, 전 지구적 물 순환 및 에너지 순환에서 변화가 예상된다[1]. 또한 기후변화는 자연 환경 뿐만 아니라 사회, 경제, 산업 등 총체적으로 영향을 미치고 있기 때문에 최근에는 수자원, 농업, 산림, 생태계, 건강 등 모든 분야에 걸쳐 나타나는 다양한 기후변화의 특성을 파악하고 있으며, 점차 증가되는 피해에 대한 대응책이 마련되고 있는 실정이다.

기후변화의 영향을 받는 다양한 분야 중 수자원 문제는 기후변화 피해의 상당부분을 차지하며 타 분야에 직·간접적 원인으로 발생하여 영향을 미친다. 우리나라의 수자원 환경은 기후변화로 인하여 급격하게 변화되고 있는 상태이다. 좁은 국토면적과 과다한 인구로 토지나 수자원 등 국토자원 이용의 강도가 다른 나라에 비하여 현저하게 높기 때문에 기후변화와 같은 약간의 기후변동으로도 심각한 수자원 문제가 발생할 가능성이 내포되어 있다. 강우패턴의 변동과 강수량 집중 현상 등이 발생하고 있으며, 이에 따라 국내 수자원환경은 장기적으로 중부지방에 강수량 증가와 남부지방에 강수량 감소가 예상되고 있다[2]. 또한 현재는 국지성 호우로 인한 수자원의 양과 질의 변화와 지역 간의 크고 작은 물 격차 문제가 발생함에 따라 이러한 추세를 고려할 때 국가적 차원의 미래 기후변화에 전망과 그에 맞는 대응책이 필요하다.

기후변화 문제를 국제사회가 공동으로 대처하기 위하여 WMO와 UNEP는 전 세계 190여 개국으로 구성된 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 설립하여 5~6년에 한번 씩 미래 기후변화 전망을 발표하고 있다. IPCC는 지난 2007년

제 4차 평가보고서를 발간한 이후 최근 온실가스 농도 변화 경향과 다양한 기술발전을 반영하여 2014년을 목표로 현재 5차 보고서를 작성 중에 있다. 우리나라 국립기상연구소는 이와 같은 국제적인 기후변화 대응에 참여하고, 국가 기후변화 적응 대책 수립 지원을 위한 기후변화 시나리오 개발을 추진하고 있으며[3] 영국 해들리 센터의 HadGEM-AO(Hadley Centre Global Environmental Model, version 2)를 이용하여 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)에 의한 우리나라의 국가표준 기후변화 시나리오를 산출하였다[4].

이 연구에서는 기후변화 시나리오 및 기후모델의 종류와 특징에 정리하고, 국립기상연구소에서 생산한 RCP 기후변화 시나리오를 적용하여 인천광역시 미래 강수량 변화를 전망하여 시공간적 변화를 예측하였다. 또한 기후변화시나리오를 실무에 직접 활용할 경우 적정성을 여부를 판단하였다.

## II. 이론적 고찰

### 1. 기후변화 시나리오

기후변화가 점차 심화되면서 기후변화 대응 및 적응 정책을 효율적으로 지원하기 위해 과학적 근거에 기반을 둔 국가차원의 통일된 미래 기후변화 자료를 사용하는 것이 필요함에 따라 국가 표준 기후변화 시나리오를 개발하게 되었다[5]. IPCC의 평가보고서는 1990년에 1차보고서가 발표되었으며 1995년도와 2001년도의 2차 및 3차 보고서를 거쳐 2007년도에 4차보고서가 발표되었다. 현재는 2014년을 목표로 5차보고서를 작성하는 단계에 있다.

기후변화 시나리오는 IPCC 1차보고서에서 제시한 SA90(Scientific Assessment 1990)을 시작으로 최근에는 SRES(Special Report on Scenarios)를 사용하였으며 현재는 SRES 시나리오를 대신하여 대표농도경로인 RCPs(Representative Concentration Pathways) 시나리오 4종이 선정되어 제공되어 지고 있다. <Table 1>에 기후변화 시나리오의 종류 및 특징을 요약하여 나타내었다.

<Table 1> Types of Climate Change Scenarios

IPCC 평가보고서	기후변화 시나리오	배출시나리오
1차보고서 (FAR) 1990년	SA90 (Scientific Assessment 1990)	<ul style="list-style-type: none"> <li>인구, 경제 성장을 위한 기술변화, 토지이용 경향, 배출량 조절 정책 등 중요 결정 요소에 대한 특정 가정을 기반으로 미래 배출량 예측</li> <li>온실가스를 줄이기 위한 미래의 기후정책에 대하여 어떠한 가정도 하지 않은 상태</li> </ul>
2차보고서 (SAR) 1995년	IS92 (IPCC Scenarios 1992)	<ul style="list-style-type: none"> <li>IS92a-f: 사회, 경제, 환경적 상황에 따라서 결과가 상당히 다양하게 모의되었기 때문에 미래의 온실가스 배출범위 또한 매우 다양함. IS92a, IS92b 시나리오는 SA90시나리오를 기반으로 개선된 시나리오이며 특히, IS92a는 6개 시나리오 중 대표적으로 사용, 당시 주로 사용하던 연료와 미래의 신재생에너지를 동시에 사용한다는 가정</li> </ul>

<Table 1> Types of Climate Change Scenarios(Continue)

IPCC 평가보고서	기후변화 시나리오	배출시나리오
3차보고서 (TAR) 2001년	SRES (Special Report on Emissions Scenarios)	<ul style="list-style-type: none"> <li>A1&lt;고성장사회&gt;: 매우 빠른 경제 성장을 전제로 21세기 중반에 인구가 최고조에 달한 후, 감소. 자원의 효율을 높이기 위한 신기술이 매우 빠르게 개발되는 미래사회를 가정</li> <li>A2&lt;다원화사회&gt;: 인구증가, 경제성장은 낮고, 환경에 대한 관심이 낮음</li> <li>B1&lt;지속발전형사회&gt;: 지역 간 격차가 적고, 인구감소, 청정자원 절약기술 도입</li> <li>B2&lt;지역공존형사회&gt;: 기후변화에 따른 경제, 사회, 환경적 문제를 지역적으로 해결하는 사회로 지속적인 인구증가와 중간 정도의 경제 성장을 가정하고 있는 시나리오</li> </ul>
4차보고서 (AR4) 2007년	SRES (Special Report on Emissions Scenarios)	<ul style="list-style-type: none"> <li>B1&lt;지속발전형사회&gt;: 지역 간 격차가 적고, 인구감소, 청정자원 절약기술 도입</li> <li>A1B&lt;고성장사회&gt;: 화석에너지와 비화석에너지원 균형, 신기술, 고효율화 기술 도입</li> <li>A2&lt;다원화사회&gt;: 인구증가, 경제성장은 낮고, 환경에 대한 관심이 낮음</li> </ul>
5차보고서 (AR5) 2013~2014년	RCPs (Representative Concentration Pathways)	<ul style="list-style-type: none"> <li>RCP2.6: 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우</li> <li>RCP4.5: 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우</li> <li>RCP6.0: 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우</li> <li>RCP8.5: 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우</li> </ul>

특히, IPCC는 4차 평가보고서('07)에 사용된 SRES 온실가스 시나리오 대신 5차 평가보고서('13)를 위해 새로운 온실가스 시나리오인 RCP를 도입하였다. SRES는 인위적인 기후변화 요인 중에서 온실가스와 에어로졸의 영향에 의한 강제력만 포함하였다면 RCP는 토지이용변화에 따른 영향까지 포함하고 있다[6]. 현재(2013년 기준) 기상청에서는 RCP4.5 및 8.5시나리오를 제곱함에 따라 본 연구에서는 RCP 4.5 및 8.5시나리오를 적용하였다. RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되었음을 가정하는 배출 시나리오으로써 IPCC SRES 중 B1과 유사하고, RCP 8.5는 온실가스 저감 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 가정하는 시나리오로써 A2-A1F1에 상응한다[7]. 또한 RCP 8.5는 4차보고서에서 주로 활용한 SRES A1B에 비해 온실가스 농도가 높은 고배출 시나리오이다.

<Table 2>는 RCP 시나리오별 복사강제력, 농도 및 SRES와의 비교를 나타낸다. RCP 시나리오의 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는  $W/m^2$ 이다. RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5에 따른 2100년 이산화탄소 농도는 각각 421ppm, 538ppm, 670ppm, 936ppm으로 예측되고, 기존 SRES 시나리오에 의한 B1, A1B, A2 시나리오에 의한 이산화탄소 농도는 550ppm, 720ppm, 830ppm으로 예측한다.

<Table 2> Overview of Representative Concentration Pathways(RCPs)[3][8]

RCP 시나리오	복사강제력1)	농도2)	경로 형태	SPRES와의 비교
RCP8.5	>8.5 c in 2100	>1.370 CO <sub>2</sub> -eq in 2100	상승	A2~A1F1
RCP6.0	6.0 W/m <sup>2</sup> (2100년)	~850 CO <sub>2</sub> -eq(2100년 이후 안정화)	안정	A1B
RCP4.5	4.5 W/m <sup>2</sup> (2100년)	~650 CO <sub>2</sub> -eq(2100년 이후 안정화)	안정	B1
RCP3-PD(2.6)3)	2100년 이전에 ~ 3 W/m <sup>2</sup> 최고치 이후 감소	2100년 이전에 ~ 490 CO <sub>2</sub> -eq 최고농도 이후 감소	상승 후 감소	-

- ※ 1) 복사강제력은 ±5%로 정의되며, 모든 인위적인 온실기체와 다른 요소들의 순효과를 포함한다.
- 2) CO<sub>2</sub> 상당농도(equivalent concentrations, 이하 CO<sub>2</sub>-eq)는 단순 계산식 Conc. = 278 \* exp(forcing/5.325)로 계산한다. 2005년 수명이 긴 온실기체들에 대한 상당농도의 최적추정치는 약 455ppm이지만 모든 인위적인 강제 요소들의 순효과에 상응하는 CO<sub>2</sub> 상당농도 추정치는 375ppm이다.
- 3) PD = peak and decline

2. 기후변화 예측 모델

전지구 기후변화 시나리오 산출을 위하여 우리나라 기상청은 영국 기상청 해들리 센터의 기후변화예측모델인 HadGEM2-AO를 사용하였다. HadGEM2-AO는 대기, 지면 해양, 해빙, 육상 수문, 에어로솔 등 기후시스템의 다양한 주요성분 모듈들의 결합모델이며[9], 대기의 수평해상도는 135km이다. 미래 기후변화 전망을 평가하기 위해서 기본적으로 1860년의 온실가스 농도로 고정하여 최소 200년 이상 적분하는 제어적분 실험을 수행하였으며, 1860년부터 2005년까지 관측된 자연과 인위적인 강제력에 대한 과거기후 모의실험 후 RCP 시나리오에 따라 2100년까지 미래 기후변화를 전망하였다.

또한 국내 기후변화 대응 지원을 위하여 전지구 기후모델에서 표현할 수 없는 복잡한 지형을 효과적으로 잘 반영하는 한반도 지역 기후변화 시나리오를 개발하였다. 지역 기후변화 시나리오 산출에는 영국 기상청 해들리 센터 지역기후모델인 HadGEM3-RA가 사용되며, 한반도 영역의 해상도는 12.5km이다. 이 정도의 관측망은 다른 나라에 비해 상당히 고해상도 관측망으로 볼 수 있으나 수요자는 여전히 보다 더 고해상도의 자료를 요구한다[10]. 이에 따라 지역기후모델로 생산된 한반도(12.5km) 기후변화 시나리오를 바탕으로 통계적 상세화 과정을 통하여 해상도 1km의 남한상세 기후변화 시나리오가 생산되었다. 관측자료(2000~2010년)를 PRIDE 모델(Parameter-elevation Regressions an Independent Slopes Model)에 적용하여 1km 해상도의 관측격자 자료를 생산하여 기후 값으로 사용하였다. RCP 시나리오 자료 산출 체계는 <Fig 1>과 같다.



<Fig 1> Production Systems for RCP Scenarios[12]

RCP 시나리오의 자료 산출은 RCP 온실가스 시나리오 사용하여 전지구 기후변화모델에 인위적 기후변화 강제력을 적용해 전지구 기후변화 시나리오 산출하고, 산출된 전지구 기후변화 시나리오를 지역기후모델에 적용하여 역학적 상세화로 한반도 기후변화 시나리오 산출한다. 그리고 이 한반도 기후변화 시나리오에 통계적 상세화 기법을 적용하여 남한 상세 기후변화 시나리오 산출하게 된다. 12.5km 한반도 시나리오 자료에서 각 격자점별로 계절 변동(Seasonal cycle)을 제거한 편차(Anomaly) 자료를 추출하여, 관측에서 얻은 기후 값에 지역기후모델의 편차를 더하면, 모델 계통오차가 제거된 새로운 1km 격자형 시나리오 자료가 생산된다[11].

III. 연구대상지역 및 강우자료의 수집

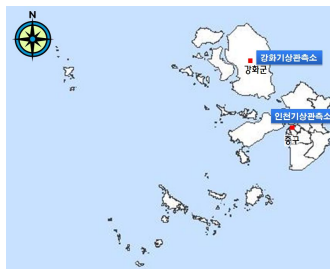
1. 연구대상지역의 일반현황

해안도시에 속하는 인천광역시시는 우리나라의 대표 항구도시로 하천과 바다가 만나는 곳에 위치하여 국내 어느 도시보다 물과 밀접한 관계를 맺고 있다. 또한 2012년 녹색기후기금 GCF 사무국 유치도시로 선정되면서 기후변화 녹색성장의 중심도시로 발돋움하고 있다. 인천의 수리적 위치는 126°37'E, 37°28'N에 해당되며 한반도의 중앙이며 황해에 접하여 있고, 한강의 하류에 위치해 있다[12]. 인천의 위치도 및 행정구역은 <Fig 2>와 같다. 2013년 현재 면적은 1,032.41 km<sup>2</sup>에 이르고 있으며 8개의 구, 2개의 군으로 구성되어 있고, 강화도, 교동도, 백령도, 영종도, 석모도 등 섬들이 위치해 있다. 또한 인구는 2013년 4월말 기준 주민등록 인구가 2,856,667명에 도달했으며 세대수는 1,104,798세대로 평균 세대원 수는 2.6명이다[13].



<Fig 2> The Administrative District of Study Area

인천은 대륙성 기후에 속하면서도 해안에 위치하여 다른 내륙지방보다는 해양성 기후의 특성도 일부 가지고 있어서 기온의 연교차가 적은 편이다. 연평균 기온은 12.1℃이며 일 최고 기온의 극값은 38.9℃(1949. 8. 16), 일 최저 기온의 극값은 -21.0℃(1931. 1. 11)이다. 강수량은 연 1,234.4mm로 비슷한 위도지역에 비해 적은 편이다[12]. 장기관측 자료를 보유하고 있는 관측지점으로는 인천, 강화 기상관측소가 있으며 자동기상관측장비(ASOS)를 통하여 기상관측을 실시하고 있다. 인천관측소는 1904년에 설치된 우리나라 최초의 관측지점 중 하나이고, 강화지점은 1971년에 관측을 시작하였다. 관측지점의 위치와 일반현황은 <Fig 3> 및 <Table 3>과 같다.



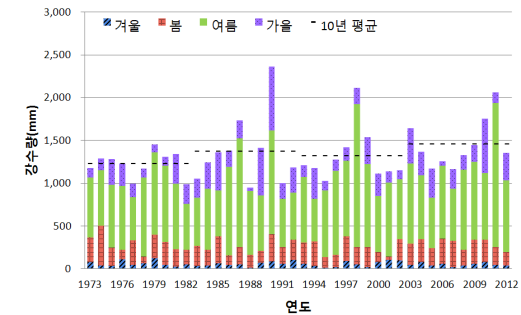
<Fig 3> The Locations of Weather Stations Used in This Study

<Table 3> General Status of Weather Station

지점	북위(°N)	동경(°E)	해발고도(m)	관측개시(년)	주소
인천	37°28'	126°37'	68.2	1904	인천 중구 전동
강화	37°42'	126°26'	47.0	1971	인천 강화군 불은면

2. 강수량자료의 수집 및 분석

인천의 강수변화 특성을 분석하기 위하여 인천의 대표 기상관측소인 강화 및 인천관측소의 최근 40년(1973~2012년)의 강수량 관측 자료를 수집하여 이용하였다. 인천기상관측소의 자료는 기상청으로부터 1960년부터 현재까지의 강수량 자료가 제공되고 있으며, 강화기상관측소의 경우 1973년부터 현재까지의 자료가 제공되어 있다. 따라서 두 지점의 동일기간의 강수량 변화를 분석하기 위하여 이 연구에서는 1973년부터 현재까지의 강수량 자료를 이용하였다. <Fig 4>는 강화 지점의 1973년부터 2012년까지 연강수량 및 계절별 강수량 변화를 나타낸다. 관측된 강수량자료에 대한 분석 결과 연강수량은 1973년 이후 1990년에 2,365.4mm로 가장 많았으며, 1988년에 953.0mm로 가장 적었다. 또한 10년 평균 강수량은 증가와 감소를 반복하고 있다.



<Fig 4> Observed Trends in Annual and Seasonal Precipitation at Ganghwa Station from the 1973 to 2012, with Linear Trend Superimposed(dashed line)

<Table 4>는 강화의 계절별 강수량 변화(1973~2012년)를 나타내는 것으로 이 연구에서는 봄은 3~5월, 여름은 6~8월, 가을은 9~11월, 겨울은 1~2, 12월로 보았다. 계절 중 봄, 가을과 겨울의 강수량은 변동성을 보이거나 여름의 경우 1973~1980년부터는 지속적으로 증가하는 경향이다. 우리나라의 강수는 여름철에 대부분 집중되기 때문에 연평균 강수량 또한 증가하는 추세이다.

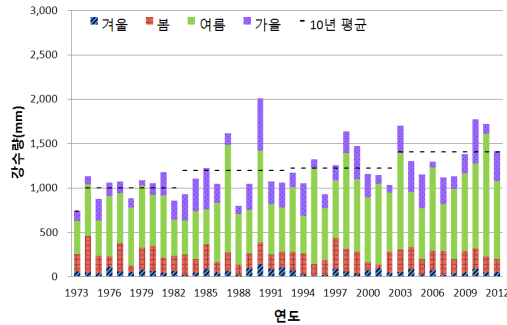
<Table 4> Seasonal Changes of Annual Precipitation at Ganghwa Weather Station(1973~2012yr)

(단위: mm)

	1973~1982년	1983~1992년	1993~2002년	2003~2012년
10년 평균	1,225.18	1,371.48	1,319.60	1,457.73
겨울	63.28	58.53	57.70	51.28
봄	236.31	208.03	195.0	243.14
여름	741.06	784.38	876.0	885.72
가을	184.53	320.54	191.0	277.60

인천기상관측소 지점의 강수량은 인천지점보다 북쪽에 위치한 강화지점보다 강수량이 적다. <Fig 5>는 인천의 1973년부터 현재(2012년)까지 연강수량 변화를 나타낸다. 관측된 강수량자

료에 대한 분석 결과 연평균 강수량은 1973년 이후 1990년에 2,009.8mm로 가장 많았으며 1973년에 739.1mm로 가장 적었다. 또한 10년 평균 강수량은 1971~1980년 이후 점차 증가하여 2001~2010년에 1,306.1mm로 가장 높은 값을 기록하였다.



<Fig 5> Observed Trends in Annual and Seasonal Precipitation at Incheon Station from the 1973 to 2012, with Linear Trend Superimposed(dashed line)

인천기상관측소 지점의 10년 평균 계절 및 연강수량의 변화는 <Table 5>에 나타내었다. 계절 중 봄, 가을과 겨울의 강수량은 변동성을 보이거나 여름의 경우 1973~1982년부터는 지속적으로 증가하는 경향이다.

<Table 5> Seasonal Changes Annual Precipitation at Incheon Weather Station(1973~2012yr)

(단위: mm)

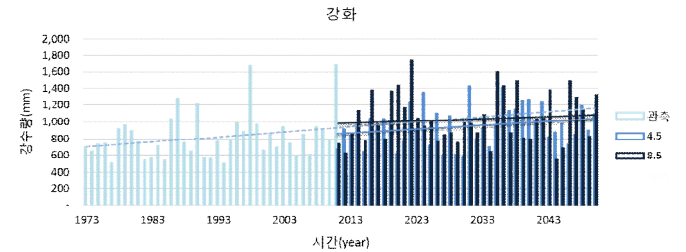
	1973~1982년	1983~1992년	1993~2002년	2003~2012년
10년 평균	995.91	1,192.70	1,218.38	1,402.34
겨울	64.83	72.33	53.69	54.33
봄	217.01	185.34	196.96	212.44
여름	564.42	636.62	767.62	863.61
가을	149.65	298.41	200.11	271.96

#### IV. 대상지역 적용을 통한 기후변화시나리오의 적정성 평가

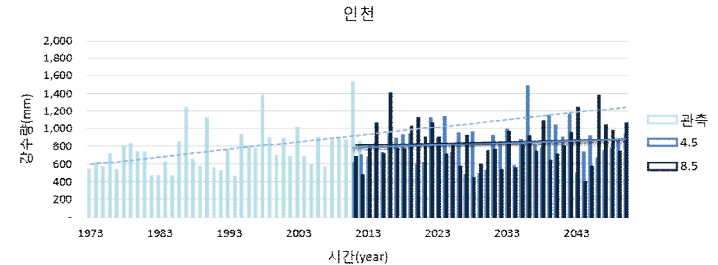
##### 1. 인천의 기후변화 시나리오에 따른 여름철 강수량 변화

우리나라는 문순지역에 속해 여름철 강수량의 편중으로 인하여 6월부터 9월까지의 홍수기에는 연 평균 강수량의 2/3이상이 내리면서 홍수피해를 유발시키고, 갈수기에는 강수량의 부족으로 인하여 하천의 유량이 고갈되는 현상을 나타내고 있다. 더욱이 최근에는 기후변화로 인하여

이상강우 등의 극지성 호우가 빈번히 발생하고 있어 그로 인한 피해는 더욱 가중되고 있다[14]. 따라서 이 기간의 자료 수집하고, 강우 특성을 분석하는 것은 중요하다. 이 절에서는 강화와 인천관측소 지점의 최근 40년간(1973~2012년)의 일강수량자료로부터 여름철 강수량 변화를 살펴보고, 기후변화시나리오에 따른 미래 40년간(2011~2050년)의 예측 강수량 변화를 비교 및 분석하였다. 강화 및 인천기상관측소 지점의 여름철 6, 7, 8월의 강수량 변화는 <Fig 6> 및 <Fig 7>과 같다.



<Fig 6> Time series of Summer(June~August) Mean Precipitation at Ganghwa Station from Observation for the Period of 1973 to 2012yr and RCP Scenarios for the Period of 2011 to 2050yr.



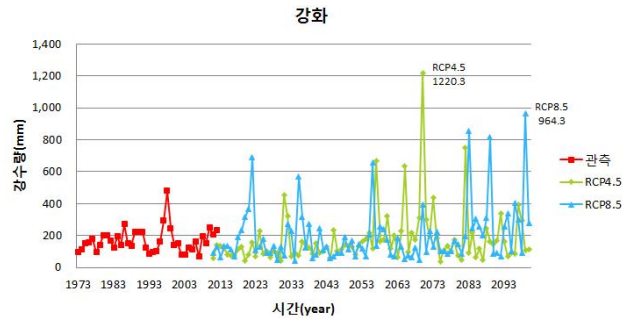
<Fig 7> Time Series of Summer(June~August) Mean Precipitation at Incheon Station from Observation for the Period of 1973 to 2012yr and RCP Scenarios for the Period of 2011 to 2050yr.

강화 및 인천 관측소지점의 여름철 강수량 변화는 현재에도 미래와 마찬가지로 강수량이 증가하는 추세로 나타났으며 과거 관측 자료의 기율기보다 기후변화시나리오를 통한 미래의 강수량은 기율이 낮은 것으로 나타났다.

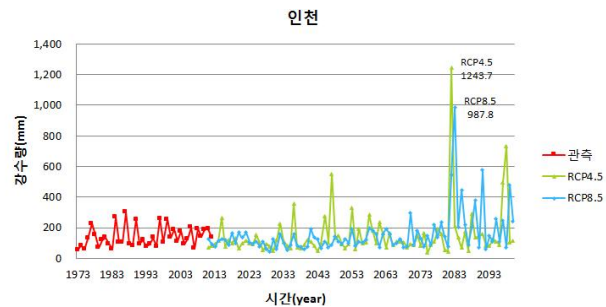
강화지점은 RCP4.5의 경우는 현재시점에서 과거의 관측 추세보다 강수량이 적고, RCP8.5의 경우는 강수량이 많은 것으로 나타났다. 또한 인천지점의 경우는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오 간의 차이가 거의 없으며 실제 관측 값의 변화 경향에서 보이는 증가추세보다 미래기후변화 시나리오의 증가 추세가 작은 것으로 나타났다. 현재 기후모형의 결과는 파소 또는 파대모의(wet bias)가 되기도 하며 이러한 편차는 미래 강우예측에 있어 비현실적 결과를 야기 시키게 되므로 이에 따른 보정이 요구된다.

## 2. 인천의 기후변화 시나리오에 따른 일최대 강수량 변화

홍수피해는 주로 여름철 짧은 시간에 내리는 집중호우에 의해 발생하기 때문에 기후변화시나리오에서 제시하는 최소단위인 일 단위 강수량자료의 연 최대치를 이용하여 인천지역에 대한 미래 강수량을 예측하고, 과거 40년간 강수량 관측 자료와 비교 분석하였다. 강화 및 인천기상관측소 지점의 지난 40년간(1973~2012년)관측 자료 및 RCP4.5, 8.5 시나리오에 의한 미래(2011~2100년) 예측 자료를 통한 연최대일강수량 변화는 <Fig 8> 및 <Fig 9>와 같다.



<Fig 8> Time Series of Daily Maximum Precipitation at Ganghwa Station from Observation for the Period of 1973 to 2012yr and RCP Scenarios for the Period of 2011 to 2100yr.



<Fig 9> Time Series of Daily Maximum Precipitation at Incheon Station from Observation for the Period of 1973 to 2012yr and RCP Scenarios for the Period of 2011 to 2100yr.

<Fig 8> 및 <Fig 9>에서 보는 바와 같이 기후변화 시나리오의 경우 21세기 후반에 연최대일강수량을 과대모의하는 이상치가 나타난다. 강화기상관측소 지점은 2070년에 RCP4.5의 경우 연최대일강수량이 1,220.3mm로 나타났으며 이는 관측개시(1971.01)이래 최고치가 나타났던 1998년 8월 6일의 481.0mm보다 2.5배 이상 되는 수치이다. RCP8.5의 경우도 연최대일강수량이 964.3mm로 관측 최고치보다 2배 이상 되는 수치가 나타났다. 또한 인천기상관측소 지점은

2082년에 RCP4.5의 경우 연최대일강수량이 1,243.7mm로 나타났으며 관측개시(1904.04)이래 최고치가 나타났던 1922년 8월 2일의 347.5mm의 3.5배 이상 크게 나타났다. 이는 인천의 연평균 강수량인 1,170.1mm보다도 높은 값이며 RCP8.5의 경우도 연최대일강수량이 987.8mm로 관측 최고치보다 2.8배 이상 되는 수치가 나타났다. 인천지역 뿐만 아니라 실무에서 기후변화시나리오를 적용할 때에는 이러한 비현실적인 값들이 존재함에 따라 반드시 이상치 검정을 실시하여 일반적인 균형분포를 벗어난 상한치 및 하한치의 이상자료들을 제거하여 사용하여야 한다.

## 3. 인천의 기후변화 시나리오에 따른 행정구역별 강수량 변화

<Fig 10>은 RCP 기후변화 시나리오 격자와 위성지도를 겹쳐 놓은 것으로 붉은 선은 인천지역을 나타내고 있다. 기상청은 전 지구 기후모델 결과를 입력자료로 활용하여 고해상도 지역기후변화모델을 이용하여 우리나라에 적합한 자료를 생산하고 있다. 그러나 한반도의 해안지역의 일부는 기후변화 시나리오 자료가 없는 상태이다. 그림에서 보는 바와 같이 인천의 경우 노란색 격자가 아닌 위성사진이 보여 지는 부분은 자료가 누락되어 있는 모습을 나타낸다. 이는 기후모델에 주변 기상관측자료를 내삽 하여야 하지만 해안선 지역의 경우 주변의 데이터들이 충분하지 못하여 정확히 묘사되기 어려우며, 해안선을 추출하는 과정에서 육지와 바다를 정확히 구분하지 않았기 때문이다. 미포함 된 지역에 대해서는 최신의 정확한 지형자료와 기상관측 자료들을 보완해야 하며 자료가 부족한 경우 보간법 등을 사용해야 한다.



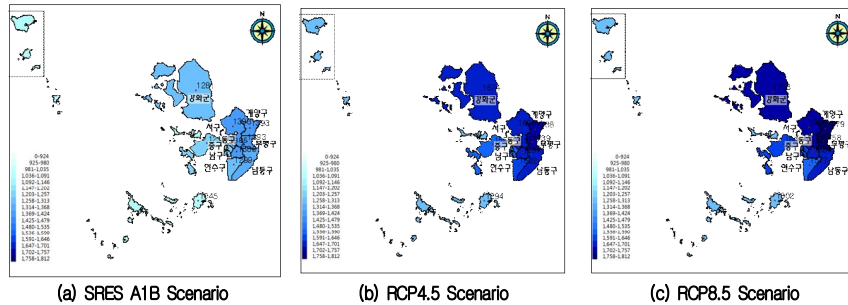
<Fig 10> Status of Grid Generation of 1km Resolution for Climate Change Scenarios in Incheon City

기상청 기후변화정보센터로부터 제공 받은 RCP4.5, 8.5 및 SRES A1B 기후변화시나리오를 활용하여 인천광역시 8개의 구, 2개의 군에 대한 시·공간적 미래 강수량을 전망하였다. <Table 6>는 각 기후변화시나리오에서 전망하고 있는 인천의 군구별 30년 평균 연강수량을 나타내며, <Fig 11>은 시나리오별 21세기 후반의 강수량 변화를 도시화한 것이다.

<Table 6> Forecast of the Changes in 30-Year Averaged Annual Precipitation of Incheon City Based on IPCC Scenarios

(단위: mm)

기간 지역	RCP4.5			RCP8.5			SRES A1B		
	21세기 전반기	21세기 중반기	21세기 후반기	21세기 전반기	21세기 중반기	21세기 후반기	21세기 전반기	21세기 중반기	21세기 후반기
중구	1,362.77	1,452.52	1,553.33	1,365.83	1,495.68	1,601.33	1,096.40	1,203.00	1,214.00
동구	1,412.06	1,522.36	1,672.17	1,407.35	1,594.79	1,673.52	1,260.90	1,365.20	1,384.50
남구	1,433.87	1,531.23	1,690.96	1,420.21	1,607.63	1,683.74	1,260.90	1,365.20	1,384.50
연수구	1,368.06	1,447.09	1,601.59	1,344.01	1,511.48	1,577.13	1,174.40	1,279.30	1,299.20
남동구	1,448.54	1,529.04	1,683.00	1,431.83	1,612.07	1,663.53	1,230.40	1,334.70	1,356.00
부평구	1,499.54	1,618.31	1,738.84	1,501.65	1,736.15	1,757.93	1,271.10	1,374.60	1,392.70
계양구	1,529.71	1,677.80	1,738.36	1,544.04	1,811.95	1,779.43	1,271.10	1,374.60	1,392.70
서구	1,463.61	1,598.16	1,698.63	1,477.51	1,678.14	1,708.57	1,271.70	1,375.50	1,392.50
강화군	1,427.15	1,610.37	1,673.88	1,512.64	1,630.79	1,752.88	1,169.60	1,274.80	1,281.30
옹진군	1,142.70	1,207.67	1,293.93	1,143.55	1,254.16	1,301.68	924.00	1,035.00	1,045.20



<Fig 11> Spatial Distribution of Precipitation in Incheon City Based on Period in the late 21st Century with IPCC Scenarios

RCP 및 SRES 기후변화 시나리오에 의한 인천의 미래(2011~2100년) 연강수량 변화는 RCP4.5, RCP8.5 및 SRES A1B 모두 21세기 전반에서 후반부로 갈수록 강수량이 증가하는 것으로 나타났다. 연강수량의 공간 분포를 살펴보면 RCP 및 SRES 시나리오 모두 현재의 지역특성과 같이 내륙의 북동쪽에 위치한 계양구의 강수량이 가장 높게 분포하고, 남서쪽으로 갈수록 강수량이 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 동쪽 내륙지역이 서쪽의 해안지역보다 강수량이 더 높은 것으로 나타났다.

V. 결론

이 연구에서는 IPCC 4차 보고서의 SRES시나리오와 새로운 시나리오인 5차 보고서의 RCP

시나리오를 인천지역에 적용하여 시나리오별 미래 강수량을 예측 하고, 대상 지역에 적용 시의 적정성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

첫째, 인천지역의 30년 이상 강수량자료를 보유하고 있는 강화 및 인천 기상관측소 지점의 연최대일강수량 변화를 예측한 결과 강화지점은 2070년에 RCP4.5의 연최대일강수량이 1,220.3mm로 이는 관측개시 이래 최고치인 481.0mm보다 2.5배 이상의 수치가 나타났다. 또한 인천지점은 2082년에 RCP4.5의 연최대일강수량이 1,243.7mm로 관측개시 이래 최고치인 347.5mm의 3.5배 이상의 값이며 이는 인천의 연평균 강수량인 1,170.1mm보다도 높은 값이다. 인천지역 뿐만 아니라 실무에서 기후변화시나리오를 적용할 때에는 이러한 비현실적인 값들이 존재함에 따라 반드시 이상치 검정을 실시하여 일반적인 균형분포를 벗어난 상하치 및 하한치의 이상 자료들을 제거한 후 사용하여야 한다.

둘째, 강화와 인천 기상관측소 지점의 기후변화 시나리오에 따른 여름철 강수량 변화는 과거 관측 자료의 기온기보다 기후변화 시나리오를 통한 미래 강수량의 기온기가 낮아 미래기후변화 시나리오가 실제 관측 값보다 과소모의(dry bias)되는 것으로 판단된다. 또한 강화지점은 RCP4.5의 경우는 현재시점에서 과거의 관측 추세보다 강수량이 적고, RCP8.5의 경우는 강수량이 많은 것으로 나타났으나, 인천지점의 경우는 RCP 4.5 및 8.5 시나리오 간의 차이가 거의 없어 온실가스의 영향이 강수량 변화에는 크게 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

셋째, 한반도의 해안선지역은 기후변화시나리오 자료가 일부 누락되어 있는 것을 발견하였다. 1km 기후변화시나리오 생산 시 최신 지형자료와 기상관측 자료 등을 보완해야 하며 자료가 부족한 경우 보간법 등을 사용해야 하며, 정확하게 해안선을 추출하여 육지를 바다로 간주하는 일이 없도록 해야 한다.

넷째, 행정구역별 강수량 변화 예측 연구를 통하여 RCP 및 SRES 기후변화 시나리오에 의한 인천의 미래(2011~2100년) 연강수량 변화를 분석한 결과, 21세기 전반에서 후반부로 갈수록 강수량이 증가하는 것으로 나타났다. 내륙의 북동쪽에 위치한 계양구의 강수량이 가장 높게 나타났으며, 남서쪽으로 갈수록 강수량이 줄어들고, 동쪽 내륙지역이 서쪽의 해안지역보다 강수량이 더 높은 것으로 나타나, 현재의 공간적 강수특성을 잘 반영하여 모의된 것으로 판단된다.

현재 기후모형의 결과는 과소 또는 과대모의가 되기도 하며 이러한 편차가 미래 강우예측에 있어 비현실적 결과를 초래하므로 이에 따른 보정이 요구된다. 기후변화 시나리오를 활용함에 있어 제공되는 시나리오를 검토 없이 그대로 사용하는 것이 아니라 적정성을 검토하여 오류의 원인이 되는 요소들을 제거하여 불확실성을 감소시켜야 한다. 결과의 검·보정뿐만 아니라 IPCC 기후변화 시나리오의 결정, 전지구 모형, 지역기후모형, 다운스케일링의 과정의 거치면서 발생할 수 있는 문제들을 단계적으로 검토하고, 빠르게 변화하는 현재의 기후요소들을 반영하여 미래 기후변화 예측의 정확도를 높여야 할 것으로 판단된다.

References

[1] IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[2] Choi, G. W. 2012. Smart Water Grid and Future Water Industry. *Halla Construction Technology Review*. 2: 13-19.

[3] National Institute of Meteorological Research. 2011. *Report on Climate Change Scenarios for IPCC AR5*. National Institute of Meteorological Research.

[4] Hyun, Y. K., M. J. Kim, S. Y. Gan, J. S. Kim, C. H. Cho, H. J. Baek, H. S. Lee, and J. H. Lee. 2012. Future Prediction and Evaluation using HadGEM2-AO and CMIP5 Climate Models for Representative Concentration Pathways. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS*. National Institute of Meteorological Research, University of Utha, USA.

[5] Korea Meteorological Administration. 2012. *See the Future by Knowing Climate Change Scenario*. Korea Meteorological Administration.

[6] Korea Meteorological Administration. 2011. *Case Studies to Understand and Take Advantage of Climate Change Scenarios*. Korea Meteorological Administration.

[7] Lee, K. M., H. J. Baek, S. H. Park, H. S. Kang, and C. H. Cho. 2012. Future Projection of Changes in Extreme Temperatures using High Resolution Regional Climate Change Scenario in the Republic of Korea. *The Korean Geographical Society*. 47(2): 208-225.

[8] Van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J. F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith, and S. K. Rose. 2011. The Representative Concentration Pathways: An Overview. *Climatic Change*. 109: 5-31.

[9] Gang, H. S., H. J. Baek, G. O. Bu, and C. H. Cho. 2012. New National Climate Change by Representative Concentration Pathways. *Magazine of Korea water resources*. 45(3): 73-79.

[10] Kim, M. K., M. S. Han, D. H. Jang, S. G. Baek, W. S. Lee, Y. H. Kim, and S. Kim. 2012. Production Technique of Observation Grid Data of 1km Resolution. *Journal of Climate Research* 7(1): 55-68.

[11] Climate Change Information Center, 2013. <http://ccs.climate.go.kr/>.

[12] Incheon Metropolitan City. 2013. <http://www.incheon.go.kr/>.

[13] Ministry of Security and Public Administration. 2013. <http://www.mospa.go.kr/>.

[14] Han, M. S., G. W. Choi, and J. Y. Park. 2011. *Importance of Minutely Rainfall Data in Consideration of Climate Change*. 2011 Korean Society of Civil Engineers(KSCE) Annual Convention. 1730-1730.

참고문헌 (References in Non-roman Script)

[2] 최계운. 2013. Smart Water Grid 체계 도입을 통한 한강유역 통합 관리 방안. 수도권광역위 정책보고서.

[3] 국립기상연구소 기후연구과. 2011. IPCC 5차 평가보고서 대응을 위한 기후변화 시나리오 보고서 2011. 기상청.

[4] 현유경, 김민지, 간순영, 김준수, 조천호, 백희정, 이효신, 이조한. 2012. RCP 기후변화 시나리오 산출에 이용된 국립기상연구소 기후모델(HadGEM2-AO)과 CMIP5 참여 모델의 성능 평가 및 미래 전망. 국립기상연구소 기후과, University of Utha, USA.

[5] 기상청. 2012. 기후변화 시나리오를 알면 미래가 보인다. 기상청.

[6] 기상청 기후과학국 한반도기상기후팀. 2011. 기후변화 시나리오 이해 및 활용사례집. 기상청.

[7] 이경미, 백희정, 박수희, 강현석, 조천호. 2012. 고해상도 지역기후변화 시나리오를 이용한 한국의 미래 기온극값 변화 전망. *대한지리학회지*. 47(2): 208-225.

[9] 강현석, 백희정, 부경은, 조천호. 2012. 대표농도경로(RCP)에 따른 신(新) 국가 기후변화 시나리오. *한국수자원학회논문집*. 45(3): 73-79.

[10] 김맹기, 한명수, 장도호, 백승균, 이우섭, 김연희, 김성. 2012. 1km 해상도의 관측 격자자료 생산 기술. *기후연구*. 7(1): 55-68.

[11] 기상청 기후변화정보센터. 2013. <http://ccs.climate.go.kr/>.

[12] 인천광역시. 2013. <http://www.incheon.go.kr/>.

[13] 안전행정부. 2013. <http://www.mospa.go.kr/>.

[14] 한만신, 최계운, 박지영. 2011. 기후변화에 따른 분단위 강우자료의 중요성 연구. *대한토목학회 정기 학술대회*.

**박효선:** 현재 인천대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정에 재학 중이다(kokomanara@hanmail.net).

**최계운:** 1985.2 서울대학교 공과대학 토목공학과 석사학위를 취득했으며(Estuary에서의 부정류의 수치해석), 1991.5 Colorado State University 토목공학과 박사학위를 취득하였다(Hydrodynamic Network Simulation through Channel Junctions). 현재 인천대학교 도시과학대학 건설환경공과부 정교수로 있으며, 2013년 11월부터 현재까지 한국수자원공사 사장을 맡고 있다(gyewoon@incheon.ac.kr).