

## 기후변화 시나리오를 이용한 미래의 강설량 예측\*

조형경<sup>1</sup> · 김삿별<sup>1</sup> · 정 혁<sup>1</sup> · 신형진<sup>1</sup> · 김성준<sup>1\*</sup>

## Projection of Future Snowfall by Using Climate Change Scenarios\*

Hyung-Kyung JOH<sup>1</sup> · Saet-Byul KIM<sup>1</sup> · Hyuk CHEONG<sup>1</sup>  
Hyung-Jin SHIN<sup>1</sup> · Seong-Joon KIM<sup>1\*</sup>

### 요 약

화석연료의 사용 증가로 인한 온실가스의 배출로 인하여 지구의 이상기후가 감지되고 있으며, 이러한 현상은 국내의 온도 변화 및 강수량의 변화에도 큰 영향을 줄 것이다. 특히 기후 변화에 따른 온도 상승은 겨울철 강설량 변동에 많은 영향을 줄 것이다. 본 연구는 이러한 변화를 평가하고자, 중권역별로 상세화 된 GCM (general circulation model) 자료를 이용하여 미래의 강설 가능성과 지역별 강설량을 예측하였다. 강설이 발생하는 원인은 매우 다양하지만, GCM에서 제공하는 정보는 최고·최저 온도, 강수량, 일사량의 네 가지 이므로, 본 연구에서는 강설가능성을 일 최저 온도와와의 상관성에 초점을 맞추어 예측하였다. 먼저 각 기상관측소별 신적설심을 기상청에서 제공받아 분석하여 강설이 내리는 온도의 조건을 추정하였으며, 추정 된 온도의 조건을 IDW (inverse distance weight) 기법을 이용하여 공간 분포시켜 지역별 온도 조건 분포도를 작성하였다. 이렇게 산정된 최고·최저온도별 경계값을 중권역별로 GCM자료에 적용시켜 미래의 강설 가능성을 예측 하였다. 연구에 적용된 기후변화 시나리오는 총 13개 이며, 각 시나리오별 편차는 다양하게 나타났으나 미래로 갈수록 강설량이 줄어드는 패턴을 나타내었다. 지구 온난화에 의한 기온 상승의 효과를 여실히 보여주었으며, 이러한 융설 기작의 시공간적 변동은 봄철 수자원에 영향을 줄 것으로 사료 된다.

주요어 : 미래기후변화, 상세화, GCM, 적설심

### ABSTRACT

Due to emissions of greenhouse gases caused by increased use of fossil fuels, the climate change has been detected and this phenomenon would affect even larger

2011년 7월 23일 접수 Received on July 23, 2011 / 2011년 8월 31일 수정 Revised on August 31, 2011 / 2011년 9월 14일 심사완료 Accepted on September 14, 2011

\* 본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2010-0029194)의 지원을 받아 수행되었음.

1 건국대학교 사회환경시스템공학과 Dept. of Civil and Env. System Eng, Konkuk University

\* 연락처 E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

changes in temperature and precipitation of South Korea. Especially, the increase of temperature by climate change can affect the amount and pattern of snowfall. Accordingly, we tried to predict future snowfall and the snowfall pattern changes by using the downscaled GCM (general circulation model) scenarios. Causes of snow varies greatly, but the information provided by GCM are maximum / minimum temperature, rainfall, solar radiation. In this study, the possibility of snow was focused on correlation between minimum temperatures and future precipitation. First, we collected the newest fresh snow depth offered by KMA (Korea meteorological administration), then we estimate the temperature of snow falling conditions. These estimated temperature conditions were distributed spatially and regionally by IDW (Inverse Distance Weight) interpolation. Finally, the distributed temperature conditions (or boundaries) were applied to GCM, and the future snowfall was predicted. The results showed a wide range of variation for each scenario. Our models predict that snowfall will decrease in the study region. This may be caused by global warming. Temperature rise caused by global warming highlights the effectiveness of these mechanisms that concerned with the temporal and spatial changes in snow, and would affect the spring water resources.

**KEYWORDS** : *Climate Change, Downscaling, GCM, Snow Depth*

## 서론

2007년 2월 2일 유엔(United Nations, UN) 정부간 기후변화위원회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 기후변화에 관한 종합 보고서를 6년 만에 발표해 지구 온난화 및 기후변화는 인간이 초래한 것이라고 강력히 지적하였다. 이러한 현상은 우리나라에도 해당 될 것이며, 기후변화에 따른 온도변화 및 강우량변화 등이 예상 된다. 최근 5년간 국내에서도 이러한 이상기후가 감지되고 있고 특히 겨울철 강설 패턴 변화로 인하여 수자원 이용에 큰 영향을 줄 것이며, 따라서 미래의 폭설 가능성 예측 기술이 필요한 실정이다.

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있고 지형이 복잡하여 기상 요소의 지역별 변동성이 크며 그에 따라 좁은 지역에서도 강설 형태가 다양하다(이훈 등, 1994; 이재규, 1999; 이승호 등, 2003; 이경미, 2006). 강설은 인간생활에 다양하게 영향을 미치는데(Changnon, 1979; Schmidlin, 1993), 최근

도로의 발달과 여가 시간의 증가로 겨울 레포츠와 교통 시스템 관리에서 강설의 중요성은 더욱 커지고 있으며, 특히 강설의 변화는 수문학적인 물 순환 기작에 영향을 줄 것이다.

강설 발생 원인에 관한 국외 연구의 경우 Braham and Dungey(1984)는 호수 효과에 의한 Michigan호의 서안과 동안의 강설량 차이가 기온의 차와 매우 밀접한 관계가 있음을 입증하였으며, Anderson and Nilson(1990)은 스웨덴 동쪽 해안 지역의 대설 현상이 따뜻한 해수면 위를 통과해 오는 차가운 동풍이 지속될 때 나타난다는 것을 밝혔고, Hartley and Keables(1998)의 대규모 대기 순환, 저기압의 이동 경로, 해수면 온도 등이 뉴잉글랜드의 겨울철 강설량에 미치는 영향을 조사한 결과 해수면 온도가 강설량과 음의 상관관계가 있음을 증명하였다. 국내 강설 메커니즘에 관한 연구에는 주로 지상의 적설량과 해수면 온도, 상·하층 바람 및 기온과 기압 등 중관, 비중관 자료를 이용하여 통계적 분석을 시도한 연구(최진식, 1985; 송병현, 1993; 정관영 외, 1999; 정영근, 1999; 광병철과 윤일

회, 2000)와 대설 사례를 중심으로 한 수치모의 연구(문길태와 김홍진, 1982; 서은경과 전종갑, 1991; 이훈과 이태영, 1994; 이재규, 1999; 이재규, 2001) 등이 있다. 또한 설경희 등(2006)은 Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research 5th generation Mesoscale Model(PSU/NCAR MM5)을 이용하여 기단 변질형 강설 사례를 대상으로 수치모의하고 그것의 미세물리 및 경계층, 그리고 지표층 과정의 영향을 알아보려고 하였으며, 정성훈 등(2006)은 한반도에서의 강설 현상이 대체로 중관 기상 조건에 의해 결정되며 이에 근거하여 5가지 강설 발생유형을 정의하였고, 이재규 등(2008)은 Weather Research and Forecasting(WRF)모델을 이용하여 강원도 지역에 북동기류가 유입 될 때 태백산맥과 영동지역사이에 연관성을 밝히고 태백산맥 지형을 모의 해석을 실시하여 강설에 미치는 영향을 해석하였다. 조구희(2008)는 영동 지역의 겨울철 강수에 대한 30년 통계자료를 분석하여, 대관령과 강릉의 지상풍이 모두 북풍일 때에는 통계적으로 대관령의 강수량이 저지대에 위치한 강릉보다도 많음을 보였고, 이재규 등(2009)은 Weather Research and Forecasting(WRF)모델을 이용하여 북한 지역의 산맥이 영동 지역의 강설 분포에 미치는 영향에 관한 수치 연구를 실시하였다. 이와 같은 우리나라의 강설 발생 메커니즘에 대한 연구는 대부분 현재의 현상 해석을 주제로 하고 있으며, 미래의 강설가능성에 대한 정량적인 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 국내 신적설심 분포를 이용하여 강설발생 패턴을 파악하고, 이를 IPCC에서 제공하는 GCM 시나리오에 적용하여 미래의 온도변화와에 따른 강설 변화량을 예측 하고자하였다. 우리나라의 강설 발생 원인은 기온, 해수면 온도, 풍향, 풍속, 기압배치, 대기 상태 등 여러 요소의 분포 및 특성과 관련이 있지만(이훈과 이태영, 1994; 이재규, 1999; 이승호와 천재호,

2003; 이경미, 2006), 미래 기후 변화 시나리오는 최고·최저 온도, 강수량, 일사량의 네 가지 정보만을 제공하므로, 본 연구에서는 일 최고 온도에서는 강설이 발생하지 않는다는 가정 하에 일 최저 온도와 상관성에 초점을 맞추어 미래 강설 가능성을 예측하였다.

## 자료 및 방법

### 1. 온도 경계값의 선정

강설이 발생 할 수 있는 온도 조건(온도 경계값)을 파악하기 위해 먼저 기상청에서 제공하는 일 단위 온도, 강수량 및 신적설 자료를 이용하였다. 특히 신적설 자료는 각 관측소마다 제공하는 기간이 다르므로, 1990년부터 2009년까지의 자료를 제공하는 관측소 42개를 선정하여 연구를 수행하였다. 신적설심이 구축된 자료 역시 일 단위 이므로, 이는 해당 날의 최고 온도 보다는 최저 온도에 더 연관성이 있을 것이라 가정하여, 최저 온도만을 추출하여 평균값을 산정하였다. 기상청에서 제공하는 자료는 일 자료로는 하루 중 어느 시간에 강설이 발생한 것인가에 대한 파악이 불가능하기 때문이다. 이렇게 추출된 최저 온도 경계값을 다시 강수량에 적용하여 검·보정을 실시하였다. 여기서 검·보정은 실제 발생한 강설 이벤트와 본 연구에서 사용한 온도/강수를 이용해 산출한 강설 이벤트가 얼마나 일치하느냐에 대한 평가이다. 검·보정 방법은 각 관측소별로 실시되었으며, 방법은 다음과 같은 순서로 실시하였다(그림 1).

- 1) 실제 강설이 발생한 총 횟수( $S_e$ )와, 온도 경계값( $T_s$ )을 이용하여 산정한 강설 발생 총 횟수( $S_s$ )의 비교를 통해 발생 확률에 대한 비교를 실시하였다( $S_s/S_e \times 100$ ).
- 2) 실제 강설이 발생한 날과 온도 경계값( $T_s$ )을 이용하여 산정한 강설이 발생한 날과의 1 대 1 비교를 통하여 발생 적중률(정확도)에 대한 비교를 실시하였다.

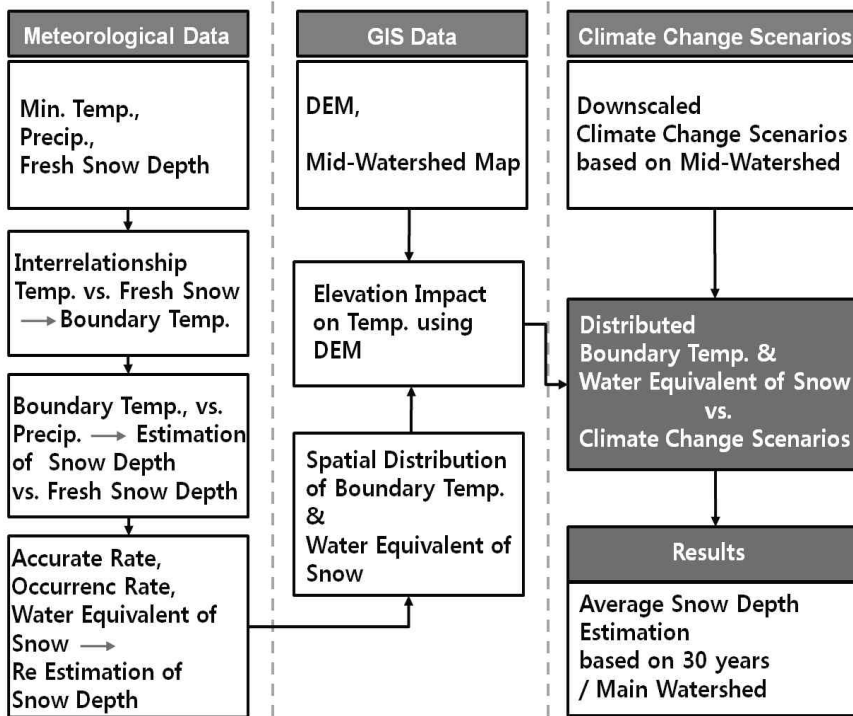


FIGURE 1. 연구의 흐름도

3) 다음으로 발생 확률과 발생 정확도에 대한 수치가 만족스러운 값을 나타 내도록 온도 경계값을 수정 ( $T_s \pm a \rightarrow T'_s$ ) 하는 방법을 이용하여 보정을 실시하였다. 실제 강설 발생 횟수( $S_e$ ) 대비, 수정 된 온도 경계값을 이용하여 산정한 강설 발생 횟수 ( $S'_s$ ) 값은 100%를 넘지 않도록 하였다 ( $S'_s/S_e \times 100 \leq 100\%$ ).

그러나 강설의 절대량에 대한 검·보정은 실시하지 않았는데, 위에서 설명하였듯이 기상청에서 제공하는 자료는 모두 일자료이므로, 하루에 발생한 강설량의 강수량전환이 100% 발생 하지 않기 때문이다. 다음 그림 2는 연구대상 지역인 국내 중권역과 자료가 수집 된 기상관측소의 위치를 나타내고 있다. 그림 3은 겨울철 영하의 온도가 발생한 날에서 강우가 발생하였거나, 또는 강설이 발생하였을 때

의 최저 온도 분포와 그 평균값을 나타낸 것이다.

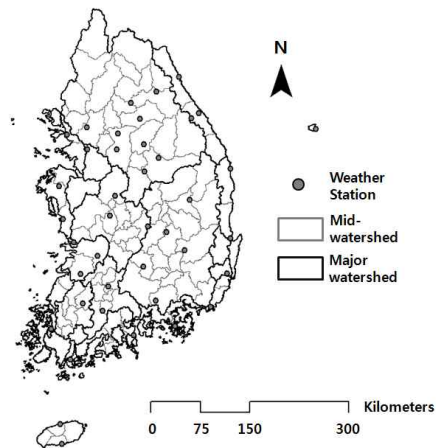
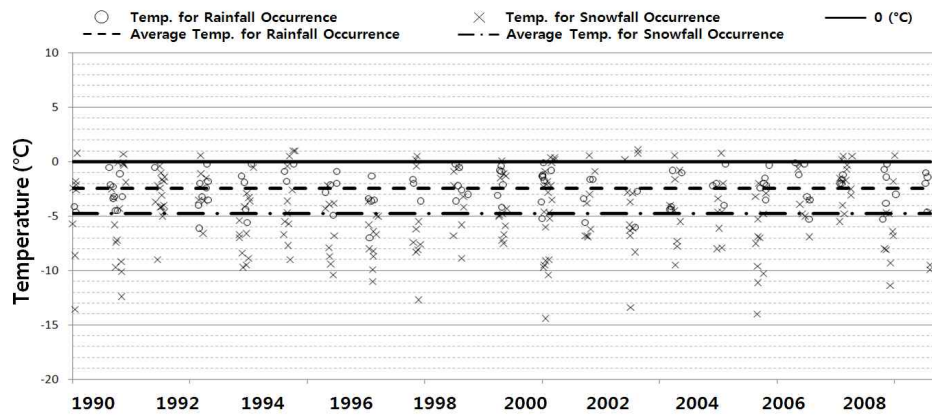
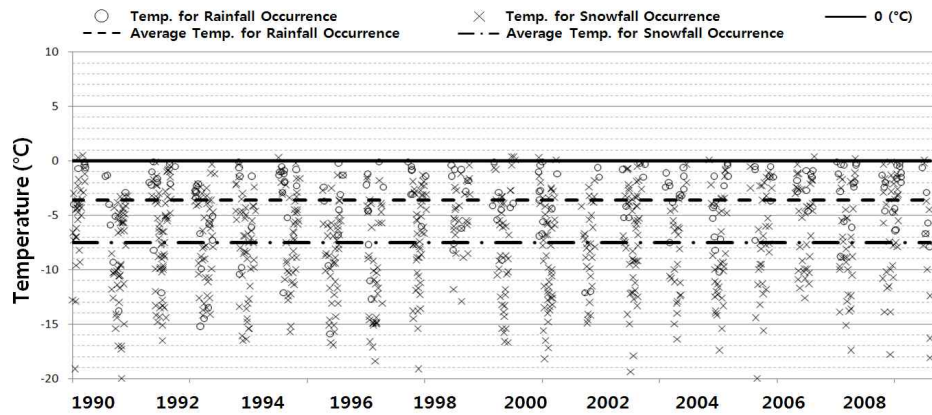


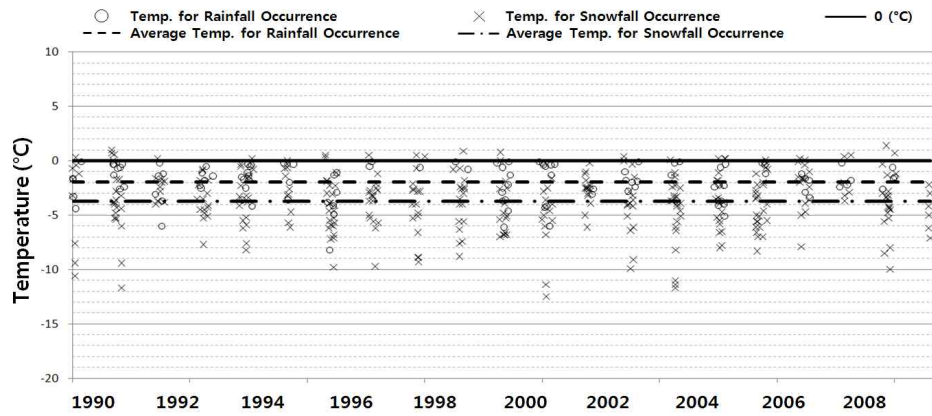
FIGURE 2. 연구 대상 중권역 및 기상 관측소



(a) 서울 최저온도



(b) 대관령 최저온도



(c) 광주 최저온도

FIGURE 3. 각 관측소별 최저 온도 경계 추출 예

TABLE 1. 산정된 최저 온도(경계값) / 물당량 및 보정 결과

관측소 이름	강우 발생 온도	강설 발생 온도	발생 확률 (%)		정확도(%)		보정값	보정 후 강설 발생 온도	물당량
			보정 전	보정 후	보정 전	보정 후			
강릉	-1.65	-2.05	53.0	79.3	40.9	56.1	1.9	-0.20	11.6
거창	-3.36	-4.99	71.8	98.0	47.0	55.0	1.0	-3.99	16.8
광주	-1.94	-3.75	48.5	100.0	44.2	79.4	2.7	-1.05	15.3
구미	-2.78	-4.77	60.0	98.5	41.5	61.5	1.6	-3.17	16.8
군산	-2.09	-4.42	47.4	97.7	43.8	76.6	2.8	-1.62	16.2
남원	-3.53	-6.43	56.8	95.4	39.8	60.2	2.1	-4.33	16.8
대관령	-3.62	-7.53	48.3	93.3	45.3	82.2	6.0	-1.53	16.1
대구	-2.03	-2.57	70.5	96.2	44.9	51.3	1.2	-1.37	15.9
대전	-2.44	-5.75	47.1	89.3	41.9	68.5	3.6	-2.15	16.6
목포	-1.75	-3.03	45.6	98.3	40.6	77.2	2.1	-0.93	15.0
백령도	-2.79	-4.24	53.5	99.2	42.6	69.8	2.7	-1.54	16.1
보령	-2.79	-4.92	53.5	98.5	42.8	67.7	2.4	-2.52	16.7
부산	-1.4	-1.77	70.8	75.0	37.5	37.5	0.8	-0.97	15.1
서귀포	-0.7	-0.52	34.7	97.0	33.7	85.1	1.4	0.88	4.1
서산	-2.79	-6.02	47.2	98.6	42.1	74.4	3.3	-2.72	16.7
서울	-2.46	-4.73	49.8	88.5	45.8	68.7	2.9	-1.83	16.4
속초	-1.97	-2.05	51.3	75.4	37.9	55.9	1.7	-0.35	12.5
수원	-2.74	-5.32	58.0	85.7	48.7	63.9	2.5	-2.82	16.7
순천	-2.78	-4.77	68.4	97.4	38.3	53.1	1.3	-3.47	16.8
안동	-3.37	-4.77	66.3	94.5	44.2	57.7	1.6	-3.17	16.8
양평	-3.22	-6.42	56.8	78.0	46.9	61.0	3.2	-3.22	16.8
여수	-1.82	-2.95	41.7	100.0	33.3	58.3	1.8	-1.15	15.5
완도	-1.53	-2.90	43.1	94.9	38.7	73.7	1.5	-1.40	16.0
울릉도	-1.02	-2.40	48.3	98.2	47.5	88.4	2.6	0.20	8.7
울산	-2.06	-2.15	95.3	100.0	41.9	41.9	0.2	-1.95	16.5
울진	-1.43	-1.84	55.8	76.0	38.5	49.0	1.1	-0.74	14.3
원주	-3.01	-6.24	51.5	80.9	45.6	59.5	3.5	-2.74	16.7
이천	-3.67	-6.18	68.6	84.8	48.2	55.0	2.0	-4.18	16.8
인제	-2.66	-6.50	42.1	76.9	39.4	62.7	4.9	-1.60	16.2
인천	-2.23	-4.32	48.0	83.6	42.7	64.9	3.0	-1.32	15.8
전주	-2.19	-4.47	49.4	98.5	42.6	70.6	2.5	-1.97	16.5
정읍	-2.78	-5.06	48.4	99.3	38.5	71.4	2.5	-2.56	16.7
제주	-0.38	-0.35	42.4	64.7	38.8	56.5	0.9	0.55	6.2
제천	-3.82	-7.81	54.2	84.0	46.7	64.1	3.9	-3.91	16.8
진주	-3.03	-3.65	124.6	96.5	45.6	42.1	-0.8	-4.45	16.8
청주	-2.73	-5.42	49.7	93.7	42.7	67.7	3.2	-2.22	16.6
추풍령	-3.07	-5.47	55.6	100.0	46.8	66.5	2.7	-2.77	16.7
춘천	-2.82	-6.07	47.7	77.3	42.9	62.0	3.5	-2.57	16.7
충주	-3.19	-6.42	54.6	87.3	43.8	59.2	2.9	-3.52	16.8
통영	-1.51	-1.93	58.3	79.2	20.8	29.2	1.1	-0.83	14.7
포항	-1.75	-1.68	63.6	89.1	32.7	45.5	1.0	-0.68	14.1
홍천	-3.29	-6.88	47.4	74.8	40.5	58.8	4.0	-2.88	16.7

표 1은 각 관측소별로 산정된 물당량 및 최저 온도 경계값 과 보정 전·후의 결과를 정리 한 것이며, 이를 그래프로 나타내면 다음 그림 4와 같다. 또한 미래의 강수량으로부터 강설량으로의 전환을 위해 Ratkowsky (1990)가 제시한 물당량 또는 물당량비(SR,  $SnowRate = Snow\ Depth / Precipitation\ Depth$ )를 사용하였는데, 그 산정식은 식 1과 같다.

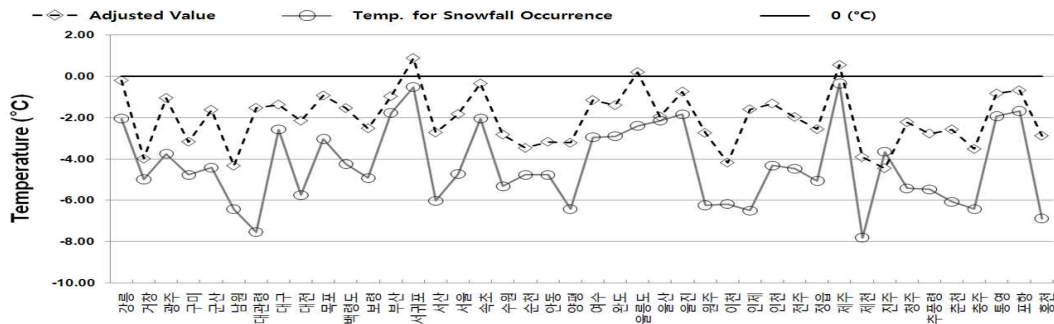
$$SR = \frac{a}{1 + \exp\left[\frac{T-b}{c}\right]} \quad (1)$$

여기서,

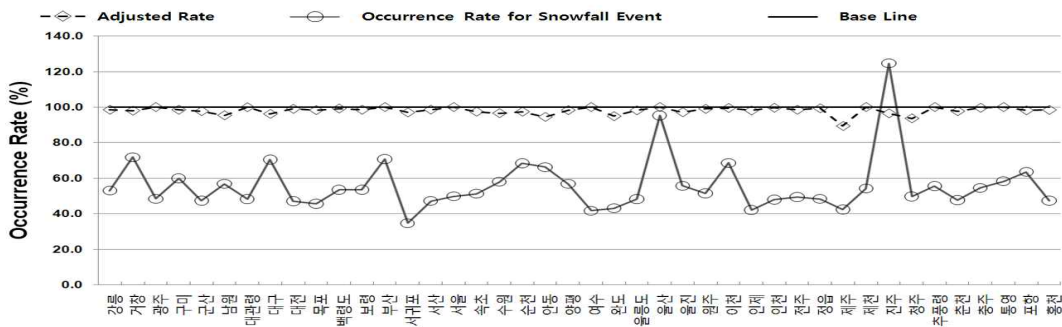
$a = 18.8, b = 0.0811, c = 0.6508,$   
 $1\ mm/3\ hour \leq PR \leq 2\ mm/3\ hour$   
 $a = 16.1, b = 0.2182, c = 0.5373,$   
 $2\ mm/3\ hour \leq PR \leq 3\ mm/3\ hour$

$a = 14.9, b = 0.2295, c = 0.5174,$   
 $3\ mm/3\ hour \leq PR \leq 4\ mm/3\ hour$   
 $a = 13.2, b = 0.2678, c = 0.5074,$   
 $4\ mm/3\ hour \leq PR \leq 5\ mm/3\ hour$   
 $a = 11.9, b = 0.1524, c = 0.5174,$   
 $5\ mm/3\ hour \leq PR,$   
 (PR = Precipitation Rate)

이태영 등(2005)이 제시한 a, b, c 값은 일반적인 강설 사례( $1\ mm/3\ hour \leq PR$ )에 대해서 각각 16.8, 0.2456, 0.5604이며 폭설 사례( $5\ mm/3\ hour \leq PR$ )에 대한 값은 각각 12.0, 0.3007, 0.4506이다. 본 연구에서 쓰인 강설 관측 자료와 미래 기후 변화 시나리오는 일자료이기 때문에 Ratkowsky (1990)가 제시한 값 대신 일반적인 강설 사례로 가정하여 a, b, c 값을 각각 적용하였다.

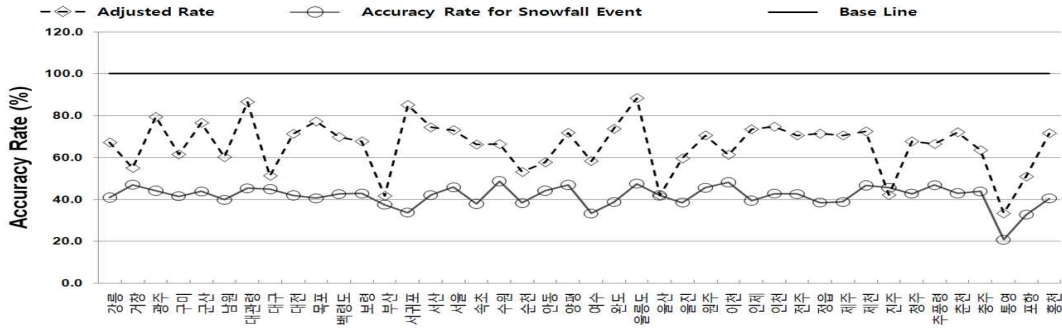


(a) 각 관측소의 강설 발생 시 최저 온도(경계값)



(b) 각 관측소의 강설 발생 확률

FIGURE 4. 산정된 최저 온도(경계값) 및 보정 결과



(c) 각 관측소의 실제 강설 발생 대비 모의 정확도(적중률)

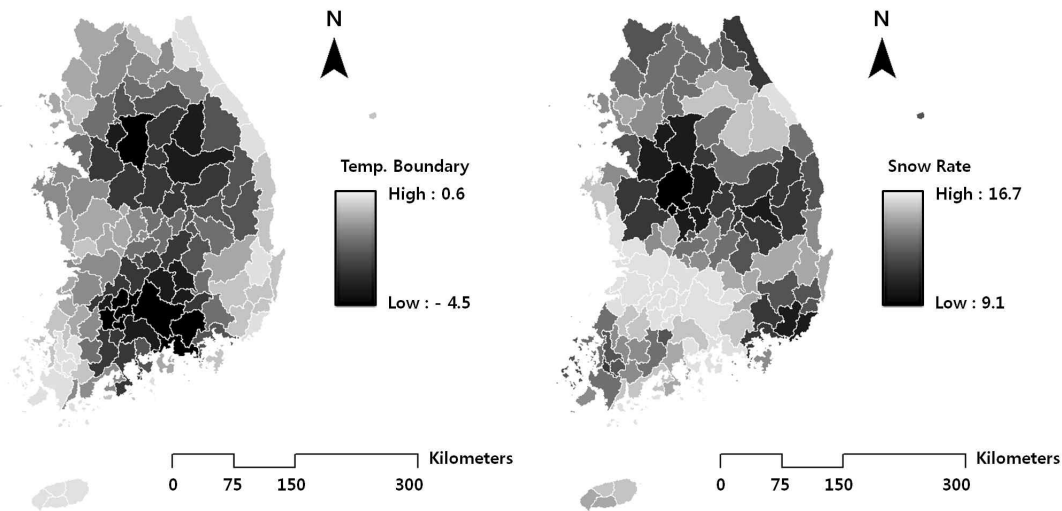
FIGURE 4. 계속

2. 경계값의 분포 및 물당량의 분포

위의 방법으로 검·보정이 실시된 온도 경계값과 물당량을 역거리 가중법(IDW, Inverse Distance Weight)을 이용하여 공간 분포를 실시하였다(그림 5). IDW의 기본 가정은 공간적으로 인접한 지점 상이의 값은 공통된 위치요인으로 인하여 유사성을 갖게 되는 반면에 두 지점사이의 거리가 증가할수록

이러한 유사성은 상대적으로 감소하게 된다는 것에 기초한(조홍래 등, 2006) 방법이며 고도에 따른 변화는 고려할 수가 없다.

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i)d_i^{-m}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-m}} \quad (2)$$



(a) 최저온도(경계값)

(b) 물당량

FIGURE 5. 중권역별로 재 산정된 최저온도(경계값) 및 물당량



식 2에서,  $Z(x)$ : 위치  $x$ 에서 예측하고자 하는 값,  $n$ : 관측지점의 수,  $Z(x_i)$ : 관측지점  $x_i$ 에서의 관측값,  $x$ : 미지점,  $d_i$ : 미지점에서 주변의 관측지점  $i$ 까지의 거리,  $x_i$ : 기지점에서  $i$ 까지의 거리,  $m$ : 가중치이다.

우리나라의 지형 특성을 감안할 때 표고에 따른 기온변화 차이가 심하기 때문에 다음 식 3과 같이 표고에 따른 기온 감률을 적용하였다.

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) d_i^{-m}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-m}} \pm (a \times DEM + C) \quad (3)$$

여기서,  $a$ : 표고에 따른 온도 증감 기울기,  $DEM$ : 수치표고모델,  $C$ : 상수이다.

이때 사용 된 DEM은 환경부에서 제공 받았으며, 격자 크기는  $1\text{km} \times 1\text{km}$  이다. 마지막으로 공간 분포 된 온도 경계값을 다시 중 권역별로 평균하여 최종 온도 경계도를 작성 하였다.

### 3. 미래 기후 변화 시나리오

기후변화에 관한 정부간 패널인 IPCC는 세계 인구의 증가, 산업·기술 전반의 발달에 따

른 이산화탄소, 메탄, 산화질소 등의 배출에 관한 다양한 시나리오(SRES, Special Report on Emissions Scenarios; Nakicenovic *et al.*, 2000)를 바탕으로 대기해양결합 대순환모델(AOGCM, Atmospheric-Ocean General Circulation Model) 기후변화 모의자료를 제공하고 있다(수자원의 지속적 확보기술개발사업 보고서, 2008). 이는 인구, 기술 경제발달 등 미래 배출 문제의 원동력이 되는 요소에 따라 크게 4개의 그룹(A1, A2, B1, B2)의 배출 시나리오를 제시하고 있다. 이 중에서 A1시나리오는 다시 A1Fi, A1T, A1B 등의 3개의 그룹으로 나뉘는데, 각각 화석연료 주도형, 비화석연료 주도형, 밸런스 형을 뜻한다(Park *et al.*, 2009). 그러나 현재의 AOGCM의 수평해상도는 약 100-200km로 한반도와 같은 특정 지역의 기후 모의 결과는 모델에 따라 그 오차가 매우 크다. 특히 AOGCM과 같이 수평분해능이 낮은 격자 체계에서 한반도는 충분한 격자점으로 표현되지 못하고 있어, 한반도의 적용을 위해서는 광역규모의 모델에서 모델의 정보를 규모 상세화하여 세밀한 공간격자를 가지는 지역기후로의 통계적 상세화가 반드시 필요하다(수자원의 지속적 확보기술개발사업 보고서, 2009). 따라서 본 연구에서는 수자원의 지속적 확보기술개발사업(2009)의 일환으로 생성 된 기후변화시나리오를 이용하였다. 사용 된 상세화 기법은 CSEOF(Cyclosationary

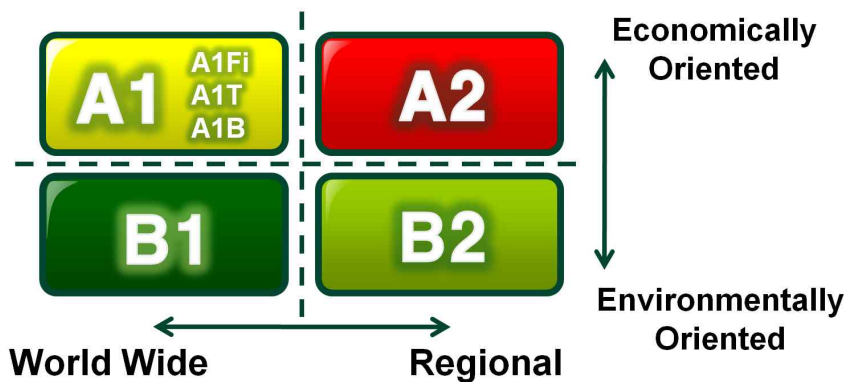


FIGURE 6. 온실가스 배출 시나리오(Joh *et al.*, 2011)

Empirical Orthogonal Function, Kim and North, 1997)에 기반을 두고 있으며, 이는 순환 정상상태를 가정함으로써 주기성을 가지고 변화하는 대기 현상의 물리적 성분들을 서로 분리하여 이해하는데 적절하다. 상세화에 사용 된 자료는 IPCC에서 제공하는 20C3M

(20th Century Climate Coupled Model)의 100년(1900년~1999년)과 미래 온실가스 배출 시나리오(A1B, A2, B1)별 100년간(2000년~2099년) 13개 모델의 기온과 강수량 자료이다. 사용 된 13개 모델은 다음 표 2와 같다.

TABLE 2. 미래 기후 예측 모델

Model Name	Country	Resolution	
		Atmosphere	Ocean
BCR	Norway	128° × 64°	360° × 180°
CCM	Canada	96° × 48°	192° × 096°
CNR	France	128° × 64°	180° × 170°
CSR	Australia	192° × 96°	192° × 189°
GF0	U. S. A.	144° × 90°	360° × 200°
GF1	U. S. A.	144° × 90°	360° × 200°
INM	Russia	72° × 45°	144° × 084°
IPS	France	96° × 72°	180° × 170°
MIM	Japan	128° × 64°	256° × 192°
MIU	Germany / Korea	96° × 48°	128° × 117°
MPI	Germany	192° × 96°	360° × 180°
MRI	Japan	128° × 64°	144° × 111°
UKC	U. K.	96° × 73°	288° × 144°

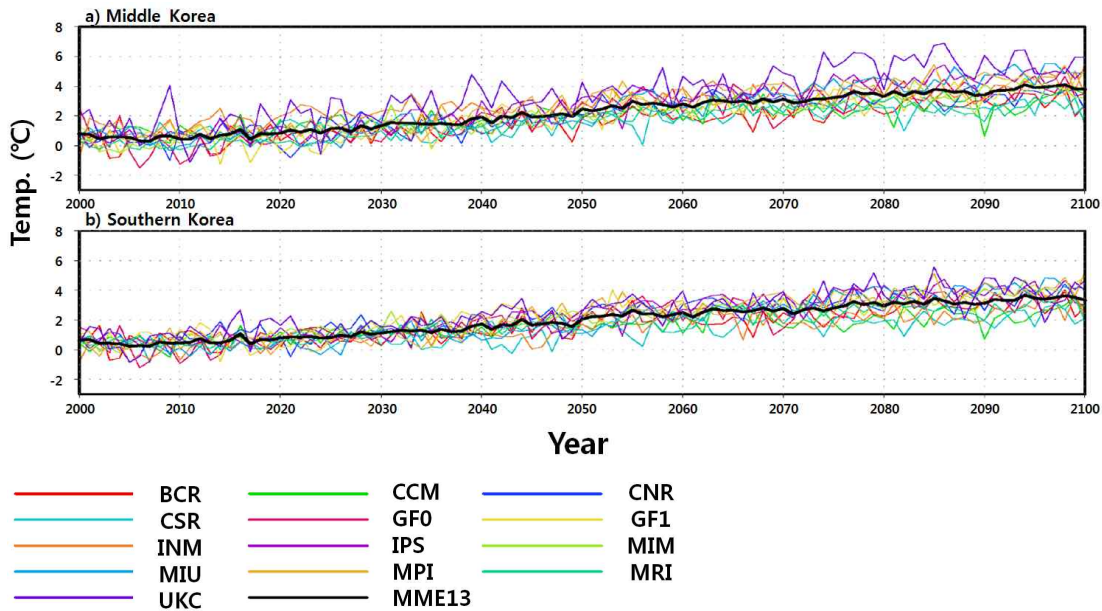


FIGURE 7. 미래의 기온 변화 전망(수자원의 지속적 확보기술개발사업 보고서, 2009)

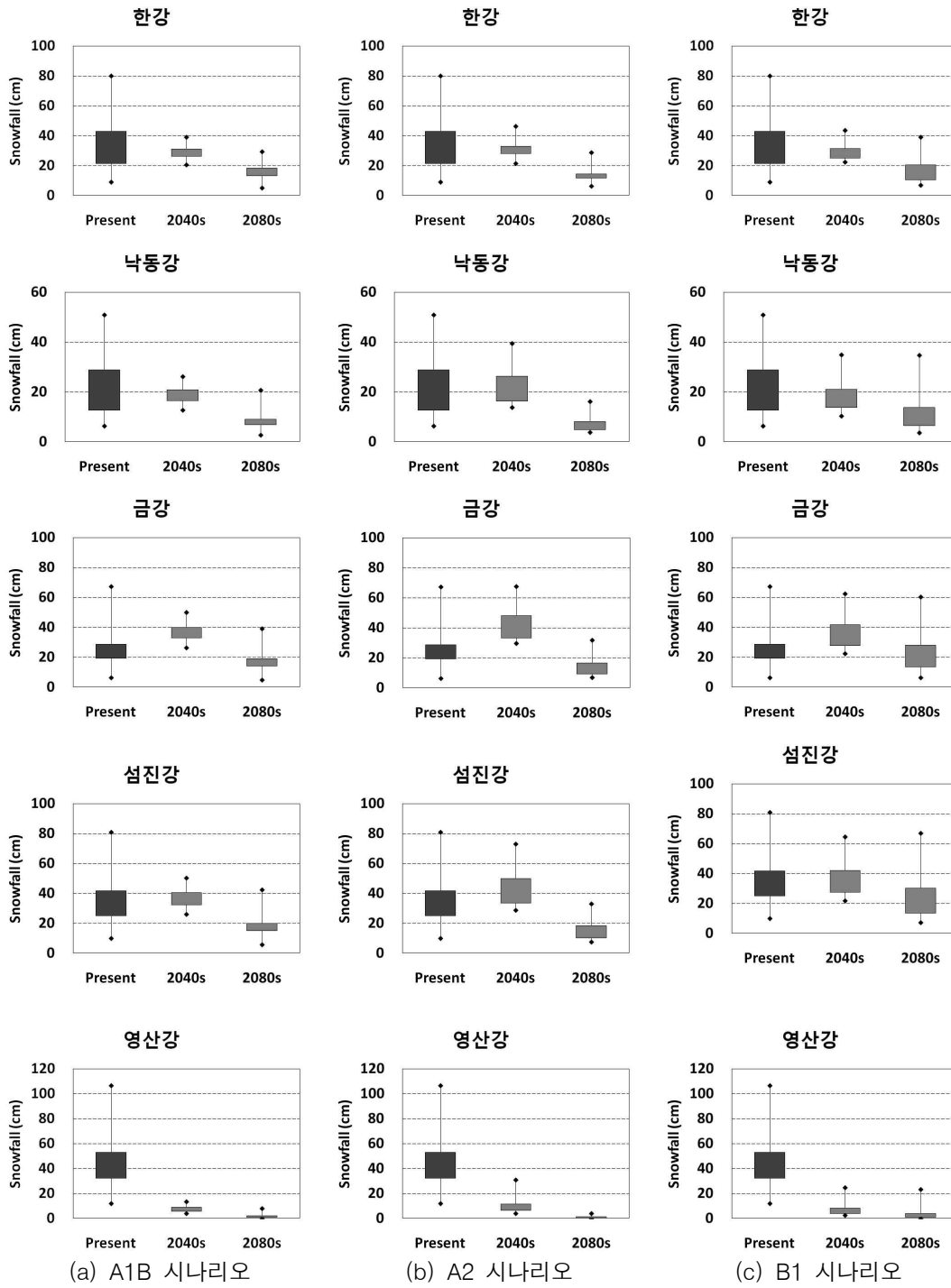


FIGURE 8. 대권역별 미래 강설량

본 연구에서 사용 된 AOGCM과 AOGCM MME13(13개의 다중 모델 앙상블, Multi Model Ensemble 13)의 미래 기온 변화는 한반도 남부지방과 중부지역에서 모두 증가할 것으로 예상 된다(그림 7). 특히 겨울철 기온 변화하는 AOGCM MME13에서 2020년대에는 약 1.0℃, 2050년대에는 약 2.4℃, 그리고 2080년대에는 약 4.2℃ 각각 상승함을 나타 냈다(수자원의 지속적 확보기술개발사업 보고서, 2009).

### 결과 및 고찰

본 연구에서 사용 된 기후변화시나리오는

중권역 단위 별로 상세화 되었으므로, 공간해 상도의 통일을 위해 온도 경계값, 물당량 등의 자료 역시 중권역별로 산정하였다. 이렇게 산정된 온도 경계값을 초과하지 않는 조건에서 각 시나리오별 강수량을 추출한 다음, 다시 물당량을 곱하여 최종적으로 강설량을 예측 하였다. 마지막으로 다음 그림 8, 표 3과 같이 국내의 대표적인 대권역별로 강설량 예측 결과를 정리하여 2040s, 2080s의 두 기간의 30년 평균값으로 나타내었다.

그 결과 한강유역의 평균 강설량은 약 29.0cm~31.0cm(2040s), 13.9cm~18.6cm(2080s), 낙동강유역의 평균 강설량은 약 18.7cm~22.0cm(2040s), 6.8cm~12.6cm

TABLE 3. 대권역별 미래 강설량

배출 시나리오	대권역	기간	미래 기후 예측 모델													평균	
			bcr	ccm	cnr	csr	gf0	gf1	inm	ips	mim	miu	mpi	mri	ukc		
A1B	한강	2040s	36.5	26.0	26.8	39.0	32.6	31.0	29.4	26.2	27.7	20.6	25.1	28.3	29.7	29.1	
		2080s	29.0	15.0	15.3	29.3	18.5	10.5	20.9	13.2	13.3	5.0	6.4	14.7	13.8	15.8	
	낙동강	2040s	26.0	15.6	16.4	26.3	19.8	21.0	19.6	16.7	17.1	12.7	14.7	17.4	20.8	18.8	
		2080s	19.8	7.7	8.4	20.7	8.9	5.1	12.2	6.9	6.9	2.7	3.4	7.8	8.0	9.1	
	금강	2040s	48.9	31.6	33.1	50.2	39.9	40.2	38.6	33.4	35.0	26.4	31.5	34.9	39.2	37.1	
		2080s	37.4	16.4	17.0	39.2	19.0	10.6	24.8	14.1	14.3	4.8	6.2	16.7	15.9	18.2	
	섬진강	2040s	49.3	31.2	32.3	50.3	38.7	42.4	39.7	33.0	35.5	26.1	29.4	34.2	40.6	37.1	
		2080s	40.2	16.8	18.8	42.5	19.9	11.3	27.3	15.0	15.9	5.7	6.9	17.3	18.9	19.7	
	영산강	2040s	13.5	4.4	5.7	12.5	8.6	9.0	7.2	5.7	6.5	4.2	3.8	7.0	9.2	7.5	
		2080s	7.5	1.2	1.3	7.9	1.2	0.4	2.6	0.9	0.9	0.1	0.1	1.3	1.9	2.1	
	A2	한강	2040s	30.3	32.9	29.1	46.4	35.7	31.5	27.4	24.9	33.1	21.4	28.0	33.8	28.9	31.0
			2080s	20.8	15.4	12.8	28.8	13.1	11.4	13.2	11.8	14.4	6.4	7.5	12.8	12.4	13.9
낙동강		2040s	15.8	26.3	19.6	39.6	26.3	22.1	15.9	16.2	27.1	13.8	20.1	24.9	18.8	22.0	
		2080s	9.2	9.0	5.8	16.2	4.8	5.9	3.8	5.1	8.1	3.9	4.2	5.9	6.5	6.8	
금강		2040s	32.5	47.0	38.4	67.7	50.8	41.7	33.1	32.1	48.5	29.7	39.7	48.0	36.4	42.0	
		2080s	17.8	18.6	11.3	32.0	9.3	12.1	7.7	10.4	16.6	7.1	7.8	12.5	12.8	13.5	
섬진강		2040s	31.7	49.8	37.7	73.1	51.3	43.9	33.5	32.2	52.2	28.9	40.7	47.3	37.2	43.0	
		2080s	19.4	20.7	12.7	33.0	10.2	13.1	8.3	10.4	18.3	7.7	9.0	13.7	14.7	14.7	
영산강		2040s	5.2	13.3	6.3	31.1	11.3	11.0	5.8	6.5	17.3	4.1	8.5	11.5	8.1	10.8	
		2080s	1.3	1.9	0.5	4.1	0.2	0.7	0.1	0.2	1.4	0.1	0.1	0.8	0.9	0.9	
B1		한강	2040s	40.9	26.4	25.0	43.8	32.6	25.3	27.0	23.4	31.4	22.4	26.6	28.6	23.6	29.0
			2080s	34.5	17.2	15.6	39.1	21.2	18.8	18.8	10.0	18.5	6.9	10.5	20.6	9.5	18.6
	낙동강	2040s	33.2	16.5	14.0	35.0	21.1	11.9	16.8	12.0	23.7	13.7	16.1	18.8	10.4	18.7	
		2080s	27.5	11.4	8.7	34.8	12.9	13.7	8.8	4.1	13.3	4.0	6.4	14.8	3.6	12.6	
	금강	2040s	61.6	32.9	27.8	62.6	41.7	24.8	33.6	24.4	43.1	29.3	33.3	36.7	22.4	36.5	
		2080s	53.0	21.1	16.7	60.5	26.2	28.1	17.8	7.6	26.6	7.7	13.5	30.5	6.4	24.3	
	섬진강	2040s	64.4	32.4	27.6	64.6	41.9	23.1	34.5	24.1	46.4	29.7	32.6	37.0	21.9	36.9	
		2080s	55.9	21.8	17.0	67.2	28.1	30.1	18.9	8.2	28.7	8.7	13.4	32.2	7.2	26.0	
	영산강	2040s	19.5	5.7	3.6	24.8	8.2	4.0	6.3	3.1	13.4	3.9	5.8	7.1	2.5	8.3	
		2080s	13.9	1.9	0.8	23.2	2.5	3.6	1.4	0.2	4.1	0.2	0.8	3.8	0.2	4.4	

(2080s) 금강유역의 평균 강설량은 약 36.5cm~42.0cm(2040s), 13.5cm~24.2cm(2080s), 섬진유역강의 평균 강설량은 약 36.9cm~43.0cm(2040s), 14.7cm~26.0cm(2080s), 영산강유역의 평균 강설량은 약 7.5cm~10.8cm(2040s), 0.9cm~4.4cm(2080s)를 나타내었다. 또한 모델 별로 산정된 평균 편차(최대값 - 최소값의 평균)는 한강유역에서 약 21.6cm(2040s), 26.3cm(2080s)를, 낙동강유역에서 약 21.3cm(2040s), 20.5cm(2080s)를, 금강유역에서 약 34.0cm(2040s), 37.8cm(2080s)를, 섬진강유역에서 37.0cm(2040s), 40.7cm(2080s)를, 영산강유역에서 19.3cm(2040s), 11.6cm(2080s)를 각각 나타내었다. 산정된 평균값과 평균편차는 시나리오와, 모델, 유역에 따라 결과값이 상이 하였으나, 지구온난화에 의한 겨울철 기온상승으로 전반적인 강설량이 크게 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 미래 강설량 산정 시 일 최고 기온요소는 사용하지 않았는데, 이는 하루 중 최고 온도일 때 강설이 발생할 가능성이 매우 낮다고 가정하였으며 미래의 온도상승에 따라 일 최고 온도 역시 상승함을 나타냈기 때문이다. 따라서 시나리오와 같은 기온상승이 미래에도 계속 이어진다면 최고 온도를 이용한 강설량 예측은 부정확 할 것이고, 이는 지구온난화의 경향이 심각함을 반증하는 결과이다. 이렇게 상승된 최고 온도는 미래의 강설량에도 영향을 줄 것이며 겨울철 융설 기작에도 상당한 변화가 일어날 것이다. 특히 영산강유역에서는 미래로 갈수록 강설량이 급격히 감소하는 경향을 보였는데, 이는 온도와 강수량만을 이용하였기 때문에 해당 유역의 강설 발생에 영향을 미치는 다른 요소를 고려하지 못하였기 때문이다. 영산강유역을 제외한 대부분 유역에서는 미래 강설량의 최대값과 최소값의 차이가 커짐을 알 수 있었는데, 이는 각 모델에 의해 발생하는 예측 불확실성이 커짐에 따른 것으로 사료된다. 또한 현재와 미래를 비교하였을 때는 현재의 변화도(bar)가 큰 양상을 보였는데, 이는

기온 상승으로 인하여 미래 강설이 발생할 수 있는 가능성이 줄어들었기 때문이다. 이러한 변화도(bar)는 미래로 갈수록 불확실성이 줄어들기 보다는 강설 가능성 자체가 줄었으므로 현재의 변화도(bar)가 큰 것이다.

## 요약 및 결론

본 연구는, 온도와 강설간의 상관관계를 알아보고, 그 상관관계를 이용하여 미래 기후 시나리오에 적용하여 미래의 강설 가능성을 예측 하고자 하였다. 강설의 가능성은 온도뿐만 아니라 기타 조건에도 영향을 받지만, 온도가 강설 가능성에 가장 큰 영향을 주면서 미래 기후 시나리오에 직접적으로 적용할 수 있는 성분이므로 온도만을 고려하여 연구를 수행하였다. 먼저 기상청에서 제공받은 기상 자료를 이용하여 온도와 강설간의 상관관계를 평가한 뒤, 수자원의 지속적인 확보기술개발 사업의 일환으로 산정된 총 13개 모델 중 3개의 온실가스 배출 시나리오에 의해 생산되고 상세화된 미래 기후 변화 시나리오에 적용하였다. 결과적으로 최저 온도를 이용한 강설량의 산정에서 미래로 갈수록 겨울철 강설량이 심각하게 감소함을 보였는데, 이는 지구온난화가 매우 심각함을 반증하는 결과이다. 또한 국지적인 특성은 제대로 반영하지 못하였는데, 강설 발생에 영향을 줄 수 있는 다른 요소를 고려하지 못하였으며 사용된 기후변화시나리오가 중권역 규모로 상세화 되었기 때문인 것으로 사료 된다. 미래로 갈수록 강설량의 최대값과 최소값의 차이가 커짐을 나타내었는데, 이는 각 모델의 예측 불확실성이 커짐에 따른 것으로 사료 된다. 강설은 특정 온도에 의해서만 발생 되지 않는다. 따라서 온도만을 이용한 모의만이 아니라 미래의 예측 가능한 다른 요소들이 연구에 반영 된다면 더욱 신뢰 할 수 있고 정확한 미래 강설량 예측이 가능 할 것이며, 모델의 예측 불확실성에 의해 발생하는 오차도 감소시킬 수 있을 것이다. 따라서 향후에는 중권역 보다 상세화

된 기상자료를 이용하여 더욱 신뢰 있고 정확한 조건을 산정할 것이며, 미래의 기타 기상 조건을 고려 할 수 있다면 더욱 정확한 결과를 나타낼 것이다. 또한 다른 공간보간법에 따른 결과의 차이도 비교해 봄으로써 본 연구의 정확도를 평가 할 것이다. **KAGIS**

## 참고문헌

- 곽병철, 윤일희. 2000. 1997년 1월 5-7일에 발생한 동해안 대설에 관한 지역별 종관특성. 한국지구과학회지 21(3):258-275.
- 문길태, 김홍진. 1982. 1981년 1월 14일-16일 사이의 저기압에 동반된 대설의 특성연구. 한국기상학회지 18(1):22-32.
- 서은경, 전종갑. 1991. 1990년 1월 29일-2월 1일 한반도에서 발생한 대설에 관한 연구. 한국기상학회지 27(2):165-179.
- 설경희, 홍성유. 2006. 기단변질형 한반도 강설 모의에 있어서 물리과정 모수화 과정의 효과. 대기 16(3):203-213
- 송병현. 1993. 우리나라 동해안 지역과 서해안 지역의 강설 특성 비교 연구. 서울대학교 대학원 석사학위논문.
- 수자원의 지속적 확보기술개발사업단. 2008. 기후변화에 의한 국가 수자원 영향분석 및 평가체계 적용. 수자원의 지속적 확보기술개발 사업 보고서. 1-54쪽.
- 수자원의 지속적 확보기술개발사업단. 2009. 기후변화에 의한 국가 수자원 영향분석 및 평가체계 적용. 수자원의 지속적 확보기술개발 사업 보고서. 2-30쪽.
- 이경미, 이승호. 2006. 호남 지방의 국지적 강설 분포와 그 차이의 원인에 관한 연구. 대한지리학회지 41(4):457-469.
- 이승호, 천재호. 2003. 시베리아 고기압 확장 시 호남 지방의 강설 분포-노령산맥 서사면 지역을 중심으로-. 대한지리학회지 38(2):173-183.
- 이재규. 1999. 대관령과 강릉 지역의 강설량 차이를 일으키는 종관 구조:사례 연구. 한국기상학회지 35(3):320-334.
- 이재규. 2001. 영동해안 대설사례 수치모의 연구. 한국기상학회지 37(1):1-12.
- 이재규, 김유진. 2008. 태백산맥이 영동지역의 강설량 분포에 미치는 영향에 관한 수치 모의 사례 연구. 대기 18(4):367-386.
- 이재규, 김유진. 2009. 북한 지역의 산맥군이 영동 지역의 겨울철 강설 분포에 미치는 영향에 관한 수치 연구. 대기 19(4):345-370.
- 이태영, 변건영, Jun Yang. 2005. 적설 깊이의 수치 예측. 한국기상학회 봄철 학술대회 논문집. 348-349쪽.
- 이훈, 이태영. 1994. 영동 지역의 폭설 요인. 한국기상학회지 30(2):197-218.
- 정관영, 정영선, 황병준. 1999. 주성분 분석을 이용한 한반도 강설 지역 구분. 한국기상학회지 35(3):466-473.
- 정성훈, 변건영, 이태영. 2006. 발생기구에 근거한 한반도 강설의 유형 분류. 대기 16:33-48.
- 정영근. 1999. 호남지방 대설 발생의 종관환경. 한국지구과학회지 20(4):398-410.
- 조구희. 2008. 개념 모델을 통한 영동 지역의 겨울철 지형성 강수에 대한 통계적 예보. 강릉 대학교 대학원 박사학위논문.
- 조홍래, 정종철. 2006. 강우자료에 대한 공간보간 기법의 적용. 한국지리정보학회지 14(1):29-41.
- 최진식. 1985. 동해와 그 연해안 대설의 기후학적 연구. 지리학 31:68-85.
- Anderson, T. and S. Nilson. 1990.

- Topographically induced convective snowbands over the Baltic Sea and their precipitation distribution. *Weather and Forecasting* 5:299–312.
- Braham, R. and M.J. Dungey. 1984. Quantitative estimates of the effect of Lake Michigan on snowfall. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 23(6):940–949.
- Changnon, S.A. 1979. How a severe winter impacts on individuals. *Bulletin of American Meteorological Society* 60(2): 110–181.
- Hartley, S. and M.J. Keables. 1998. Synoptic associations of winter climate and snowfall variability in New England. *International Journal of Climatology* 18: 281–298.
- Joh, H.K., J.W. Lee, M.J. Park, H.J. Shin, J.E. Yi, G.S. Kim, R. Srinivasan and S.J. Kim. (In press) Assessing climate change impact on hydrological components of a small forest watershed through SWAT calibration of evapotranspiration and soil moisture. *Transactions of the ASABE*.
- Kim, K.Y. and G.R. North. 1997. EOFs of harmonizable cyclostationary processes. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 54:2416–2427.
- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.H. Ronger, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukle, S. Smith, R. Swart, H. van Rooijen, N. Victro and Z. Dadi. 2000. *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press. 570pp.
- Park G.A., H.J. Shin, M.S. Lee, W.Y. Hong and S.J. Kim. 2009. Future potential impacts of climate change on agricultural watershed hydrology rice irrigation reservoir by release control. *Paddy Water Environ* 7:271–282.
- Ratkowsky, D.A. 1990. *Handbook of Nonlinear Regression Models*. Marcel Dekker. 241pp.
- Schmidlin, T.W. 1993. Impacts of severe winter weather during December 1989 in the Lake Eric snowbelt. *Journal of Climate* 6:759–767. **KAGIS**