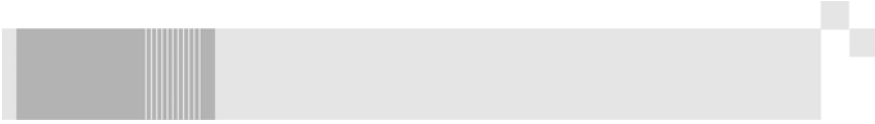


정책연구보고
2012-02

동계올림픽 개최지 주변 기후변화 영향 예측 및 모니터링 계획 수립



목차

연구요약

제1장 서론	3
제1절 연구배경 및 목적.....	3
1. 연구의 배경.....	3
2. 연구의 목적.....	4
제2절 연구범위 및 방법.....	6
1. 연구의 범위.....	6
2. 연구 방법.....	8
제2장 기후변화 현황	11
제1절 기후현황 분석.....	11
1. 우리나라 기후현황.....	11
2. 강원도 기후현황.....	12
제2절 개최지 주변 기후현황.....	14
제3절 개최지 주변 기후변화 분석.....	28
1. 개최지 주변지역 계절변화.....	28
2. 올림픽 기간 기후변화 영향.....	30
3. 강릉지역의 기후 계절 변화.....	32
제4절 기후변화 인식조사.....	33
1. 설문 조사 방법.....	33

2. 인식조사 결과	37
제3장 기후변화 전망	49
제1절 기후변화 시나리오	49
제2절 신기후변화 시나리오	58
제3절 개최지 주변 기후변화 시나리오 전망	63
1. 국가기후변화 시나리오에 따른 전망	63
2. SRES 시나리오 활용	70
제4장 동계올림픽 환경계획	79
제1절 과거 올림픽 사례	79
제2절 평창동계올림픽 환경계획	90
1. 신재생 에너지 분야	93
2. 건축(경기장) 분야	94
3. Green IT 분야	96
4. 교통 및 수송 분야	97
5. 물·자원 순환 분야	98
6. Carbon Share Promotion 분야	100
7. 기타 분야	101
제5장 개최지 주변 기후 모델링	105
제1절 WRF 수치모형	105
1. WRF 수치모형의 개요	105
2. 격자체계	107
3. 토지이용도	110
4. WRF 모델의 활용 예	112
제2절 모델링 실행	115
1. 모델링 영역 및 대상기간	115
2. 물리적 옵션 적용	116

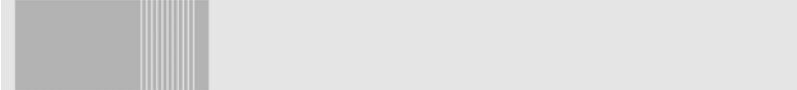
3. 토지이용도의 변화.....	117
제3절 모델 결과.....	118
1. 시계열	118
2. 수평분포	119
3. 기후모델링의 필요성.....	120
제6장 기후모니터링 방법.....	123
제1절 기후모니터링.....	123
1. 기상 모니터링.....	123
2. 이산화탄소 모니터링.....	127
제2절 기후관련 동계올림픽 지원 계획 조사.....	130
제3절 모니터링 위치선정 방법론 개발.....	136
1. 기후 모니터링 기준 및 기후지수 조사.....	136
2. 모니터링 위치 선정기준 및 방법론.....	138
제7장 결론 및 정책제언.....	147
제1절 결론.....	147
제2절 정책제언.....	149
참고문헌.....	151



표목차

<표 2.1 > 강원도 평년 기후(1981-2010)	13
<표 2.2> 대관령 기상대 10년 평균 기온과 누적 강수량	16
<표 2.3> 강릉 기상대 10년 평균 기온과 누적 강수량	17
<표 2.4> 대관령 2월의 10년 평균 기온과 누적 강수량	19
<표 2.5> 강릉 2월의 10년 평균 기온과 누적 강수량	19
<표 2.6> 대관령 3월의 10년 평균 기온과 누적 강수량	21
<표 2.7> 강릉 3월의 10년 평균 기온과 누적 강수량	22
<표 2.8> 평창 주변 AWS의 2000년대 평균 기온과 누적 강수량	26
<표 2.9> 강릉 주변 AWS의 2000년대 평균 기온과 누적 강수량	27
<표 2.10> 사계절 분류 기준	29
<표 2.11> 평창과 강릉의 계절 변화	29
<표 3.1> IPCC 발간 기후변화 평가보고서	50
<표 3.2> 온실가스 배출시나리오의 배출인자별 특성 비교(Tar)	52
<표 3.3> 기존 기후변화 시나리오 비교	59
<표 3.4> 전지구 및 한반도 기후변화 전망	61
<표 3.5> 기후변화정보센터 제공 RCP시나리오 현황	62
<표 3.6> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량	64
<표 3.7> 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량	65
<표 3.8> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 2월의 10년 평균 기온과 강수량	67
<표 3.9> 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 2월의 10년 평균 기온과 강수량	67
<표 3.10> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 3월의 10년 평균 기온과 강수량	69
<표 3.11> 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 3월의 10년 평균 기온과 강수량	69

<표 3.12> 통계적 축소법과 동적 축소법의 장단점	71
<표 4.1> 2006 토리노동계올림픽 대회운영에서 발생한 이산화탄소배출량 (예측)	83
<표 4.2> HECTOR 프로젝트에서 확보한 탄소배출권 현황 (2006년 4월 현재)	84
<표 4.3> 2010 밴쿠버동계올림픽 대회운영에서 발생한 이산화탄소배출량 (예측)	86
<표 4.4> 분야별 온실가스감축 목표	92
<표 5.1> USGS 와 KME의 토지이용도 분류 비교	112
<표 6.1> 관측센서 형식 및 내용	137
<표 6.2> 대표적 기후지수	138
<표 6.3> 쌍대비교 값	140
<표 6.4> 쌍대비교 행렬 구성	140
<표 6.5> N×N 쌍대비교행렬에서 무작위지수	142



그림목차

<그림 1.1> 연구의 공간적 범위	6
<그림 1.2> 연구추진 체계	8
<그림 2.1> 우리나라 기후도(1981-2010)	12
<그림 2.2> 평창과 강릉에 위치한 기상대 지점과 AWS 지점	14
<그림 2.3> 대관령 기상대 지점의 연평균기온과 누적 강수량	15
<그림 2.4> 강릉 기상대 지점의 연평균기온과 누적 강수량	16
<그림 2.5> 대관령 기상대 지점의 2월 평균 기온과 누적 강수량	17
<그림 2.6> 강릉 기상대 지점의 2월 평균 기온과 누적 강수량	18
<그림 2.7> 대관령 기상대 지점의 3월 평균 기온과 누적 강수량	20
<그림 2.8> 강릉 기상대 지점의 3월 평균 기온과 누적 강수량	21
<그림 2.9> 평창지역 AWS 지점의 평균기온	22
<그림 2.10> 평창지역 AWS 지점의 최고기온	23
<그림 2.11> 평창지역 AWS 지점의 최저기온	23
<그림 2.12> 평창지역 AWS 지점의 강수량	24
<그림 2.13> 강릉지역 AWS 지점의 평균기온	24
<그림 2.14> 강릉지역 AWS 지점의 최고기온	25
<그림 2.15> 강릉지역 AWS 지점의 최저기온	25
<그림 2.16> 강릉지역 AWS 지점의 강수량	26
<그림 2.17> 개최지 주변 계절 변화	30
<그림 2.18> 대관령과 강릉의 2월 기후변화	31
<그림 2.19> 대관령과 강릉 3월 기후변화	31
<그림 2.20> 강릉지역 기후 계절 변화	32

<그림 2.21> 응답자 현황	37
<그림 2.22> 연령 분포	37
<그림 2.23> 응답자 학력	38
<그림 2.24> 관련 교육참석 여부	38
<그림 2.25> 응답자 직업분류	38
<그림 2.26> 기후변화 문제 인지 여부	39
<그림 2.27> 기후변화 위험 인지 여부	39
<그림 2.28> 기후변화 문제 인지 경로	39
<그림 2.29> 분야별 기후변화 영향 인지	40
<그림 2.30> 기후변화 진행 인지정도	41
<그림 2.31> 기후변화 영향에 의한 생활고 여부	41
<그림 2.32> 기후변화 피해 예상 정도	42
<그림 2.33> 지역 기후변화 대응을 위한 지자체 필요 정책	42
<그림 2.34> 환경올림픽 계획에 대한 인지여부	43
<그림 2.35> 올림픽 개최가 기후변화에 미치는 영향	44
<그림 2.36> 환경올림픽의 지역적 영향인지	44
<그림 2.37> 환경올림픽계획의 전지구적 영향	45
<그림 2.38> 올림픽계획의 환경과 경제 중심 판단	45
<그림 3.1> SRES 시나리오 개요	52
<그림 3.2> 시나리오별 지표온도 상승 전망	53
<그림 3.3> IPCC 평가 보고서 세대별 지리적 해상도 특징	54
<그림 3.4> 신시나리오에 따른 전망	58
<그림 3.5> RCP 시나리오별 이산화 탄소 배출량 추이	60
<그림 3.6> 기후변화 시나리오 산출과정	61
<그림 3.7> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 기온과 강수량	63
<그림 3.8> 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 기온과 강수량	64
<그림 3.9> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 2월 기온과 강수량	66
<그림 3.10> 강릉 지점의 RCP시나리오에 의한 2월 기온과 강수량	66
<그림 3.11> 대관령지점의 RCP 시나리오에 의한 3월 기온과 강수량	68

<그림 3.12> 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 3월 기온과 강수량	68
<그림 3.13> DAI Portal에서 제공하는 GCM 격자	72
<그림 3.14> 한반도 주변 GCM 지점	73
<그림 3.15> SDSM 초기화면	73
<그림 3.16> SDSM 상세화 과정	74
<그림 4.1> 동계올림픽 대회의 기후변화대응 목표 및 전략	80
<그림 4.2> 2002 솔트레이크동계올림픽 시설(유타올림픽오벌)	81
<그림 4.3> 2010 밴쿠버올림픽 빌리지	85
<그림 4.4> 2010밴쿠버동계올림픽 기간 동안 실시간 모니터링 대상 건물	88
<그림 4.5> 탄소배출 실시간 모니터링 예	89
<그림 4.6> 2018평창 동계올림픽 슬로건	90
<그림 4.7> 2018평창 동계올림픽 경기장	91
<그림 4.8> Green Dream: O ₂ Plus Winter Games 개념	92
<그림 4.9> 신재생 에너지 분야 목표	93
<그림 4.10> 신재생에너지 분야 사업별 로드맵	94
<그림 4.11> 건축 분야 Concept Design	95
<그림 4.12> 건축 분야 사업별 로드맵	95
<그림 4.13> Green IT 분야 Concept Design	96
<그림 4.14> Green IT 분야 사업별 로드맵	97
<그림 4.15> 교통 및 수송 분야 Concept Design	97
<그림 4.16> 교통 및 수송 분야 사업별 로드맵	98
<그림 4.17> 물·자원 순환 분야 Concept Design	99
<그림 4.18> 물·자원 순환 분야 사업별 로드맵	99
<그림 4.19> Carbon Share Promotion 분야 Concept Design	100
<그림 4.20> Carbon Share Promotion 분야 사업별 로드맵	101
<그림 5.1> WRF Modeling system 흐름도	107
<그림 5.2> WRF 수직 및 수평 격자체계	108
<그림 5.3> 여러 격자를 이용한 다양한 등지 격자 구성	109
<그림 5.4> WRF의 수직 좌표	109

<그림 5.5 > 수직 좌표 시스템의 비교	110
<그림 5.6> WRF 모델 활용 사례1	113
<그림 5.7> WRF 모델 활용사례2	114
<그림 5.8> 모델링 도메인 영역(3km, 1km)	115
<그림 5.9> Parameterizations의 직접적인 상호작용	116
<그림 5.10> 강릉지역의 토지이용도 변화	117
<그림 5.11> 강릉지역 개발 전 · 후 기온 모사결과 시계열	118
<그림 5.12> 강릉지역 개발 전 · 후 기온 모사결과 수평분포	119
<그림 6.1> 자동기상관측 장비(Automatic Weather System; AWS)	124
<그림 6.2> 소형 기후기록장치(HOBO)	125
<그림 6.3> 휴대용 온·습도 측정기	126
<그림 6.4> 통합기상관측장비(WXT510)의 구조	127
<그림 6.5> 비분산적외선분석계의 구조	128
<그림 6.6> 휴대용 이산화탄소 측정기	129
<그림 6.7> AHP 분석과정	140
<그림 6.8> 분석을 위한 계층구조	143



동계올림픽 개최지 주변 기후변화 영향 예측 및 모니터링 계획 수립

- WMO 5차 장기계획 요약보고서(2000)에 따르면 기상에 대한 투자는 투자액의 10 배 이상의 효과 발생
- 우리나라 GDP 52%(약400조)수준 날씨 영향에 민감(미국 : 42%, 일본 : 51%)
- 2018평창동계올림픽 유치 당시 국제사회에 약속한 환경올림픽 운영을 위한 다양한 이행계획 수립 중 기후변화 영향 고려 필요
- 강원도와 2108평창동계올림픽 조직위원회의 올림픽관련 정책 특히 환경계획과 관련한 기초자료를 제공을 목적으로 연구 수행

▣ 도출된 연구 결과 및 성과

- 우리나라와 강원도의 기후현황 분석
- 개최지 주변(평창, 강릉) 기후현황 분석
 - 평창, 강릉지역 기상대(2개)와 AWS(11개)지점에 대한 과거 30년간 자료 분석
 - 기온 : 평균기온, 최고기온, 최저기온이 1980년대 대비 2000년대 약 1℃ 상승

강수량 : 1980년대에 비해 1990년대 17% 증가

- 올림픽 개최기간인 2월과 장애인 올림픽 개최기간인 3월 기후 분석
 - 2월 평균 기상 : 1980년 대비 최고 2°C 증가하지만 최고기온은 1°C 이하유지
 - 3월 평균 기상 : 최고기온의 증가(1.5°C)가 두드러짐(평균기온 0.5°C 증가)
- 계절 길이 분석결과 평창의 경우 겨울이 9일 줄고 여름은 16일 증가
- 기간 동안 2월과 3월의 추운 날과 따뜻한 날 증가 추세
 - 올림픽 경기 운영에 큰 리스크로 작용할 가능성 존재
- 개최지 주변 시민 대상 기후변화 인식 조사
 - 평창군, 강릉시 일반 시민 대상 설문 실시
 - 기후변화에 인식은 높게 나타나고 있으나 관련 정보에 대한 노출도 낮음
 - 환경올림픽보다 경제올림픽을 더 중요하게 고려
 - 개최지 주변 시민들에 대한 교육 홍보의 필요성 인지
- RCP 기후변화 시나리오에 따른 개최지 주변 기후변화 전망
 - 올림픽 개최시기 전후 최대 1°C 온도상승 전망
 - 3월의 경우 경기운영에 영향을 미칠 것으로 예측 가능
- 동계올림픽 환경계획 조사
 - 최근 3개의 동계올림픽 운영에 대해 기후변화 대응사업 조사
 - 2018평창동계올림픽 특별보고서 조사
- 개최지 주변 기후 모델링
 - WRF 모델을 이용한 강릉지역 기후모델링 실시
 - 토지이용 변화에 의한 온도상승 확인
 - 향후 올림픽 계획 수립 후 기후모델링 필요성 인식
- 기후모니터링 방법 및 모니터링 적지 선정 방법론 제시
 - 기후모니터링 방법 및 장비 조사·분석
 - 기후관련 동계올림픽 지원 계획 조사
 - 모니터링 위치 선정기준 및 AHP 분석을 활용한 방법론 제시

▣ 연구 관련 정책 제언

- 개최지 주변 지역민에 대한 환경올림픽 계획 홍보 및 교육 필요
설문조사 결과 기후변화나 환경관련 교육 관련 계획을 수립하여 지역민들의 환경 올림픽에 대한 의식수준 향상도모
- 기후지수 개발 공표 및 올림픽 기간 혹한이나 이상고온 대비 행동매뉴얼 작성
- 2018평창동계올림픽 조직위원회 차원의 모니터링 노력 경주
올림픽 운영에 도움 될 수 있는 자료 축적 위해 조직위 중심 모니터링 노력 필요
- 올림픽을 위한 효율적 기후변화대응 역할 분담
국가, 조직위, 강원도 등 관련기관들의 기후변화 대응 업무 역할분담 논의 필요
- 기후변화 위험도 작성
강원도의 관점에서 기후변화에 대한 위험(취약)지구 선정 및 운영 방안 마련과 기후변화와 관련된 위험지도를 시스템으로 구축 운영할 인력과 재원마련이 시급

≡ 키워드 : 2018동계올림픽, 기후변화 모니터링, 기후변화 예측

제 1 장

서 론

제 1 절 연구배경 및 목적

제 2 절 연구범위 및 방법

제 1 장

서 론



제1절 연구배경 및 목적

1. 연구의 배경

기후변화는 우리사회의 다양한 영역에 위기요인을 가져다주고 있다. 지난 약 100년간(1908~2018) 한반도 기온은 1.7℃, 강수량은 19% 증가했다(국립기상연구소, 2009). 특히나 이수치는 세계평균 기온상승의 2.3배에 달하고 있어 기후변화의 영향을 많이 받을 것은 자명한 사실이다. 환경부(2011) 보도자료에 따르면 2100년까지 기후변화로 인한 우리나라 누적피해는 약 2,800조원으로 전망되고 있는데, 수자원, 산림생태계, 건강, 연안피해 등 다양한 분야에서의 피해를 예측하고 있다. 또한 우리나라는 2010년 한해 이상기후 즉 기후변화에 의한 사회경제적 손실이 약 3조원에 달하는 것으로 나타났다(농촌진흥청, 2011). 이렇듯 전지구적인 다양한 영역에서의 피해가 예상되고 있고, 특히 우리나라는 기후변화에 의한 영향을 더욱 많이 받는 것을 알 수 있으며, 받을 것으로 예측되는 바 이에 대한 분석과 예측 및 대응방안 마련이 필요할 것이다.

강원도는 1년 전 전지구적 관심의 중심에서 2018평창동계올림픽 개최가 확정되어 철저한 경기 운영준비를 위한 다양한 정책들을 지원하고 있다. 하지만 하계올림픽과는 다르게 동계올림픽은 기상조건에 따라 올림픽의 성공개최 여부에 많은 영향을 받게 됨에 따라 기후변화의 영향이 올림픽 개최에 어떠한 영향을 미칠 것인지에 대한 예측과

이에 대한 준비가 필요할 것이다. 이를 위해 현재 올림픽 개최지 주변의 기후변화 영향과 올림픽 개최 시기를 비롯한 전후 기후변화 영향을 분석함으로써 올림픽 개최계획에 기후변화 영향을 고려할 수 있는 기초자료 제공이 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 우리나라 및 강원도와 올림픽 개최지 주변의 기후변화 영향을 분석하여 기후변화 진행정도를 가늠하고, 2018평창동계올림픽 개최를 위한 저탄소 동계올림픽 특별보고서 Green Dream : O₂ Plus 공표를 비롯한 환경올림픽 계획을 타 올림픽들과 비교분석하였다. 또한 개최지 주변 기후변화를 예측하여 올림픽 개최 당시의 기후변화 영향을 예측할 수 있는 자료를 조사·분석하였다. 모니터링 계획수립 부분은 현재 올림픽조직위원회와 기상청이 추진 중인 사업을 조사하고 지역의 기후 모델링을 실시하여 올림픽 개최에 따른 미기후 영향을 예측하였다.

2. 연구의 목적

본 연구는 2018평창동계올림픽 개최지 주변의 기후변화 현황분석과 기후변화 영향예측, 특히 올림픽이 개최되는 2, 3월의 기후변화 영향을 분석하였으며, 기후변화의 다양한 모니터링 방법론을 제시하여 향후 기상청과의 사업진행시 고려하도록 하였다. 이 연구는 환경올림픽의 성공적 개최를 위한 기후변화 영향 관련 기본자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서의 주요 연구목적은 다음과 같다.

- 기후변화 현황 분석
 - 우리나라 및 강원도의 기후현황 분석
 - 올림픽 개최지 주변(강릉, 평창) 기후변화 현황 분석
- 기후변화 전망
 - IPCC에서 제공하는 기후변화 시나리오 소개
 - 기후변화 시나리오에 따른 개최지 주변 기후변화 전망

- 올림픽 환경계획 비교분석
 - 외국 올림픽 환경계획 사례 조사
 - 평창동계올림픽 계획과의 비교

- 올림픽 개최지 주변 기후 모델링
 - 기후모델 소개
 - 강릉지역 토지이용 변화에 따른 기후모델링

- 기후모니터링 적지선정
 - 기후모니터링 방법론 조사
 - 기상청 동계올림픽 지원 계획 조사
 - 모니터링 위치선정 방법론



제2절 연구범위 및 방법

1. 연구의 범위

2018평창동계올림픽 개최계획 수립에 있어 기후변화 영향을 고려하기 위해 개최지 주변 기후변화 현황과 기후변화 영향 예측에 중점을 두고 연구를 진행했으며, 이에 더하여 환경올림픽계획 사례와 평창동계올림픽의 비교분석, 개최지 주변 기후 모델링, 기후모니터링 적지선정 방법론 개발 등의 연구를 수행하였다.

본 연구의 공간적 범위는 올림픽 개최지 주변(강릉, 평창) 지역이며 시간적 범위는 과거 30년간(1981년~2011년)간의 기상자료와 2100년까지 기후변화 시나리오를 분석하였다.



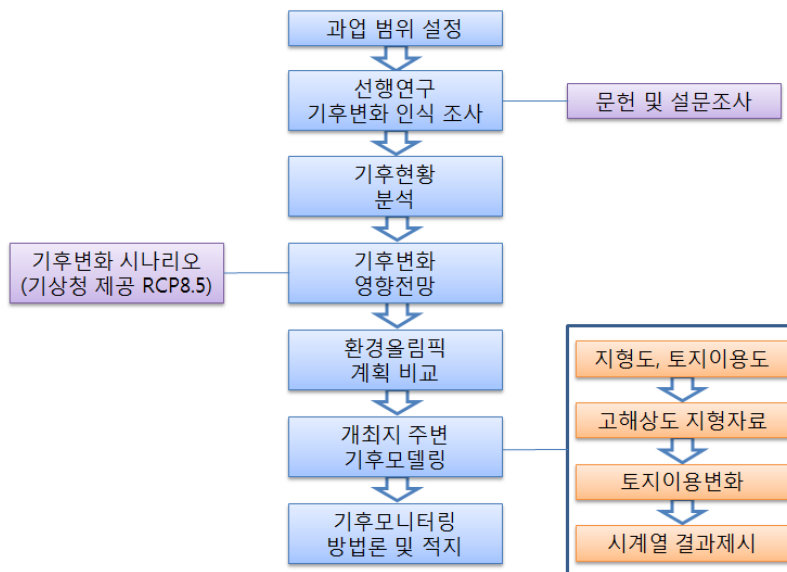
<그림 1.1> 연구의 공간적 범위

본 연구의 내용적 범위는 ① 우리나라 및 강원도 기후현황 분석, ② 올림픽 개최지 주변 기후변화 현황 분석, ③ 기후변화 시나리오에 따른 개최지 주변 기후변화 전망, ④ 올림픽 환경계획 비교 분석, ⑤ 올림픽 개최지 주변 기후 모델링, ⑥ 기후모니터링 방법론 및 적지선정으로 요약할 수 있다.

내용적 범위인 6개의 세부연구를 통해 올림픽 개최지 주변의 기후변화 현황과 전망을 분석하여 개최지 주변의 기후변화 예측을 통해 올림픽 개최계획 수립에 참고하도록 하였다. 또한 현재 기 수립되거나 공표된 환경올림픽 개최계획을 여타 올림픽의 그것과 비교 분석하였고 개최지 주변 미기후의 영향예측의 중요성 부각을 위해 올림픽 개최지 주변 기후 모델링을 실시하여 올림픽 계획이 개최지 주변 기후에 미칠 수 있는 영향에 대한 대책 강구 필요성 부각하였다. 또한 기후모니터링의 방법론 조사와 이를 통해 현재 올림픽 개최를 위한 기상·기후 관측 추진정책들에 참고하도록 하였으며, 구체적인 모니터링 계획 수립은 현재 올림픽 시설에 대한 완전한 계획 수립전인 이유로 연구조정위원회와 자문회의 등을 통해 과제 범위에서 제외하였다.

2. 연구 방법

본 연구를 수행하기 위해 올림픽 개최지 주변의 일반 주민 기후변화 영향에 대한 설문 조사를 실시하였으며, 기상청에서 제공하는 각종 기상자료를 바탕으로 기후현황을 분석하고 국가표준기후변화시나리오에 따른 기후변화 영향을 전망하였다. 또한 평창동계 올림픽의 환경올림픽 계획을 타 올림픽 계획과 비교하여 환경올림픽을 위한 정책수립에 도움을 주고자 하였다. 개최지 주변 기후모델링은 WRF 수치모형을 통해 개발계획이 주변 미기후에 미치는 영향에 대해 제시함으로써 올림픽 계획시 미기후 모델링의 필요성을 인식시키고자 하였으며, 마지막으로 현재 추진 중이거나 계획 중인 올림픽 관련 기상·기후관련 사업 조사와 이들 사업에서 적용 가능한 기후모니터링 기법에 대한 조사를 실시하였다. 이를 통해 올림픽 관련 정책 수립시 기후변화의 영향을 고려하는 정책반영에 도움이 되고자 하였다. 연구추진체계는 다음 <그림 1.2>와 같다.



<그림 1.2> 연구추진 체계

제 2 장

기후변화 현황

- 제 1 절 기후현황 분석
- 제 2 절 개최지 주변 기후현황
- 제 3 절 개최지 주변 기후변화 분석
- 제 4 절 기후변화 인식조사

제2장

기후변화 현황



제1절 기후현황 분석

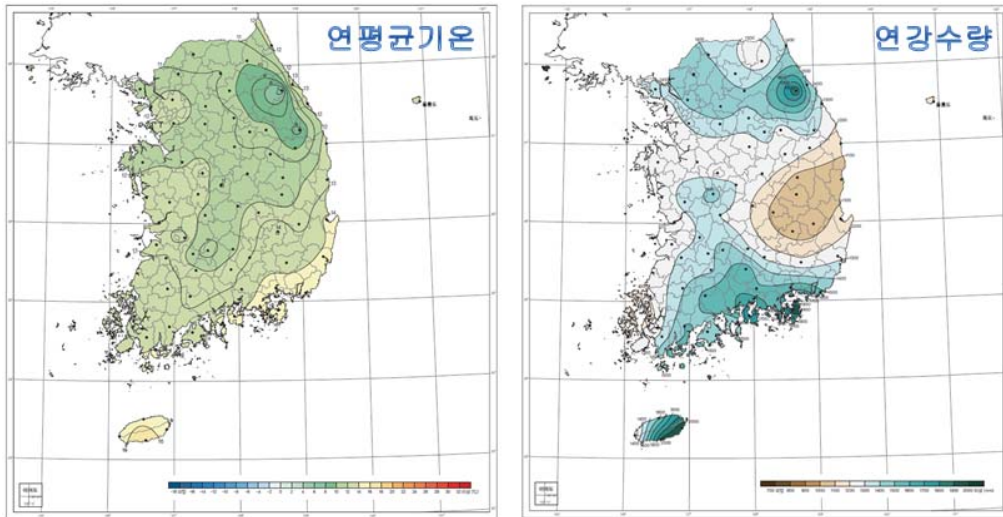
1. 우리나라 기후현황

우리나라는 지리적으로 중위도 온대성 기후대에 위치하여 봄, 여름, 가을, 겨울의 사계절이 뚜렷하게 나타난다. 겨울에는 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조하며, 여름에는 고온 다습한 북태평양 고기압의 영향으로 무더운 날씨가 보이고, 봄과 가을에는 이동성 고기압의 영향으로 맑고 건조한 날이 많다.

우리나라의 기온은 중부산간, 도서지방을 제외하고, 연 평균기온은 10~15℃이며, 가장 무더운 달인 8월은 23~26℃, 가장 추운달인 1월은 -6~3℃이다.

연중 지역별 강수량은 중부지방 1,200~1,500mm, 남부지방 1,000~1,800mm 이다. 경북지역은 1,000~1,300mm 이며, 경남해안 일부지역은 1,800mm 정도, 제주도 지방은 1,500~1,900mm 이다. 계절적으로는 연 강수량의 50~60%가 여름에 내린다.

기상청에서 제공하는 한국기후도에 따르면 동계 올림픽이 열리는 평창 주변의 연평균 기온은 다른 지역과 비교하여 낮은 기온이 나타나며, 연평균 강수량은 다른 지역과 비교하여 많은 강수량이 나타난다(그림 2.1).



<그림 2.1> 우리나라 기후도(1981-2010)

2. 강원도 기후현황

강원도는 남북으로 길게 뻗은 태백산맥을 중심으로 영동과 영서로 분리되어 있어 기후적으로 다른 특성을 나타내고 있다. 연평균기온은 영동 11.0℃, 영서 10.8℃로 6.6~13.1℃의 분포를 보이고 있다. 강원도의 최저기온 극값은 철원 -29.2℃, 최고기온 극값은 강릉 39.4℃를 기록하였다. 연강수량은 1,300~1,900mm로 강원산간을 중심으로 많은 강수량을 보인다. 강원 동해안 및 산간지방은 우리나라 대설 다발지역으로 늦겨울인 1,2월에 많은 눈이 내리고 북동기류 유입 시 더욱 많이 내린다.

30년간의 기후자료를 일별, 순별, 월별, 년별로 평균한 자료를 평년값이라 한다. 강원도의 평년값은 <표 2.1>과 같다.

동계올림픽 개최지 주변인 대관령과 강릉 지역을 자세히 살펴보면, 대관령은 해발 772.4m의 고산지대에 위치하여 바람, 안개, 기온 등 고산 기후 특성이 나타난다.

연평균기온은 6.6℃이고, 최고기온이 30℃이상 되는 날이 거의 없으며, 0℃이하의 일수는 110일 이상이다. 6~10월의 월 평균기온이 20℃를 넘지 않는 경우가 많으며, 6월에서 9월까지의 안개 발생이 잦아 연평균 안개일수가 11일에 달하고, 이로 인한 일

조 시간의 감소도 나타난다. 연강수량은 1,898.0mm로 여름철에 50%로 편중되어 있으며, 바람은 주로 서풍으로 평균풍속이 4.3m/s로 연중 강한 편이다. 특히, 동절기에는 북동기류의 영향으로 기상변화가 심하고 대설 현상이 많다.

강릉지역은 동해바다에 접한 해안지역과 태백산맥에 접한 산간지역과의 중간에서 다양하고 복잡한 기후를 나타내어 행정구역상으로 강릉시에 속하더라도 산간이나 해안에 근접한 지역에서는 기후값에 있어 차이를 보일 수 있다.

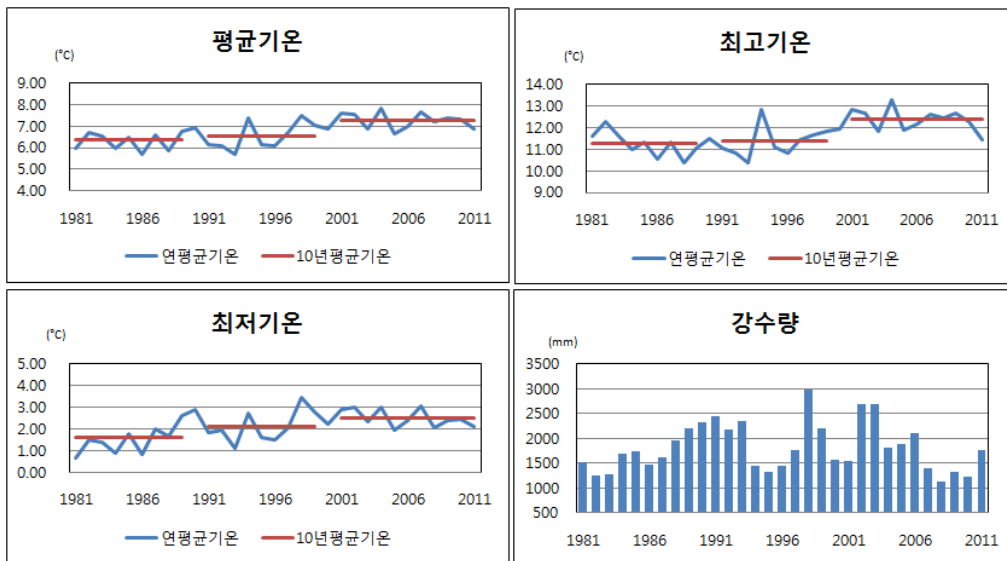
연평균기온은 13.1℃이며, 연평균 최고기온과 최저기온은 각각 17.5℃, 9.2℃이다. 같은 위도의 서해안보다 기후가 온난하고, 여름에는 태백산맥의 서쪽보다 시원하다. 연강수량은 1,464.5mm이며, 월별로 살펴보면 강수량은 7~9월의 여름철에 집중되어 있고, 12~2월의 겨울철에는 월평균 40~60mm 안팎으로 여름철과 비교하면 큰 차이를 나타낸다. 특히 8월에는 평균 298.0mm의 높은 강수량을 나타낸다. 연평균풍속은 2.6m/s이며, 겨울철과 봄철에 강풍현상이 자주 있으며, 계절과 관계없이 북동기류의 유입시 날씨가 나빠지며 강수 현상을 나타내는 특징을 가진다.

<표 2.1> 강원도 평년 기후(1981-2010)

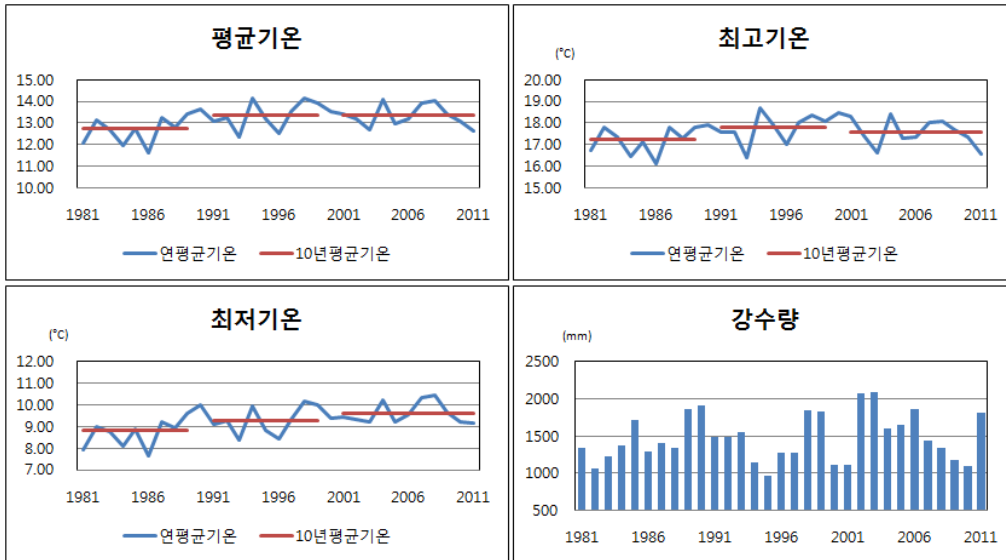
	강릉	춘천	원주	속초	철원	울릉도	대관령
평균기온(℃)	13.1	11.1	11.3	12.2	10.2	12.4	6.6
최고기온(℃)	17.5	17.2	17.4	16.2	16.2	15.8	11.5
최저기온(℃)	9.2	5.9	6	8.5	4.7	9.8	2
평균습도(%)	61.4	71	69.3	65.7	70.4	74.3	73.3
강수량합(mm)	1464.5	1347.3	1343.6	1402.2	1391.2	1383.4	1898
평균풍속(m/s)	2.6	1.3	1.1	2.8	1.8	3.7	4.3

제외하고는 대관령 기상대와 마찬가지로 상승하는 경향이 나타났고, 강수량에서도 마찬가지로 별다른 특징은 없었다.

<그림 2.4>는 대관령 기상대 지점의 2월 평균 값을 나타낸 그래프로 연평균 값과 마찬가지로 기온은 상승하는 추세이고, 강수량은 50mm 이상의 빈도수가 증가했다.



<그림 2.3> 대관령 기상대 지점의 연평균기온과 누적 강수량



<그림 2.4> 강릉 기상대 지점의 연평균기온과 누적 강수량

<표 2.2>에서는 대관령 기상대 지점의 연평균 기온과 강수량값을 10년 평균하여 나타내었다. 기온은 최근으로 올수록 점점 상승하였으며, 평균기온은 2000년대에 7.26℃로 6.35℃인 1980년대에 비해 약 0.9℃ 상승하였다. 최고기온은 약 1.1℃, 최저기온은 약 0.9℃ 상승하였다.

강수량은 1990년대에 약 2,005mm로 가장 높았으며, 1980년대에 비해서 2000년대도 높은 값을 나타내었다.

<표 2.2> 대관령 기상대 10년 평균 기온과 누적 강수량

항목	1980년대	1990년대	2000년대
평균기온(℃)	6.35	6.56	7.26
최고기온(℃)	11.26	11.39	12.37
최저기온(℃)	1.63	2.13	2.52
강수량(mm)	1707.75	2005.24	1780.46

<표 2.3>에서는 강릉 기상대 지점의 연평균 기온과 강수량값을 10년 평균하여 나타

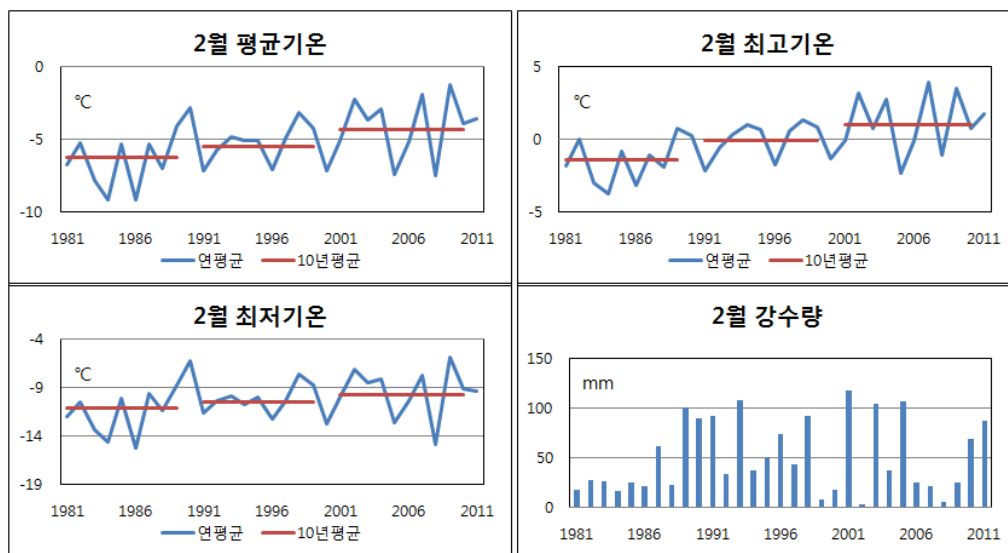
내었다. 최저기온을 제외한 평균기온과 최고기온은 1990년대에 가장 높았으며, 평균기온은 2000년대에 13.34℃로 12.72℃인 1980년대에 비해 약 0.6℃ 상승하였다. 최고기온은 약 0.3℃, 최저기온은 약 0.8℃ 상승하였다. 대관령과 비교하여 기온의 상승폭은 작게 나타났다.

강수량은 2000년대에 약 1,570mm로 가장 높은 값이 나타났으며 1980년대에 비해 약 120mm 증가하였다.

<표 2.3> 강릉 기상대 10년 평균 기온과 누적 강수량

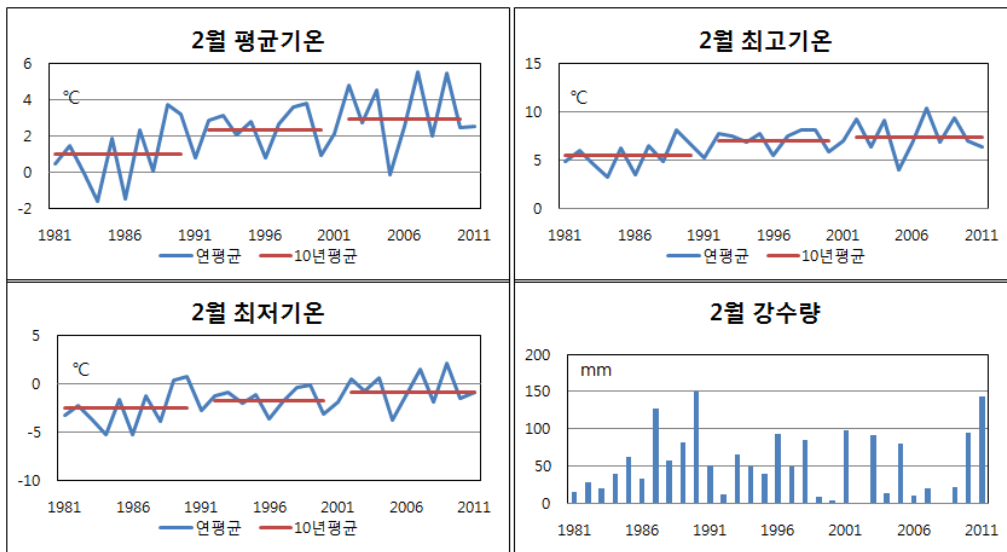
항목	1980년대	1990년대	2000년대
평균기온(℃)	12.72	13.36	13.34
최고기온(℃)	17.24	17.81	17.56
최저기온(℃)	8.80	9.28	9.61
강수량(mm)	1450.12	1397.28	1570.02

<그림 2.5>는 대관령 기상대 지점의 2월 평균 기온과 강수량을 나타낸 그래프이다. 2월 역시 평균, 최고, 최저기온 모두 상승하는 경향이 나타났다.



<그림 2.5> 대관령 기상대 지점의 2월 평균 기온과 누적 강수량

<그림 2.6>은 강릉 기상대 지점의 2월 평균 기온과 강수량을 나타낸 그래프이다. 2월 역시 평균, 최고, 최저기온 모두 상승하는 경향이 나타났다.



<그림 2.6> 강릉 기상대 지점의 2월 평균 기온과 누적 강수량

<표 2.4>에서는 대관령 지점의 2월의 10년 평균 기온과 강수량을 나타내었다. 연평균 기온과 마찬가지로 점점 상승하는 결과가 나타났으며, 최고기온은 1990년대까지는 영하의 값이었지만 2000년대에 들어서 영상의 값으로 상승하였다. 평균기온은 1980년대에 비해 2000년대에 약 2°C상승하였고, 최고기온은 약 2.3°C, 최저기온은 약 1.4°C 상승하였다.

강수량은 1990년대에 가장 높은 값이며, 1980년대에 비해 2000년대에 약 12mm 증가하였다.

〈표 2.4〉 대관령 2월의 10년 평균 기온과 누적 강수량

항목	1980년대	1990년대	2000년대
평균기온(℃)	-6.26	-5.45	-4.29
최고기온(℃)	-1.44	-0.09	0.99
최저기온(℃)	-11.14	-10.44	-9.69
강수량(mm)	41.07	55.88	54.85

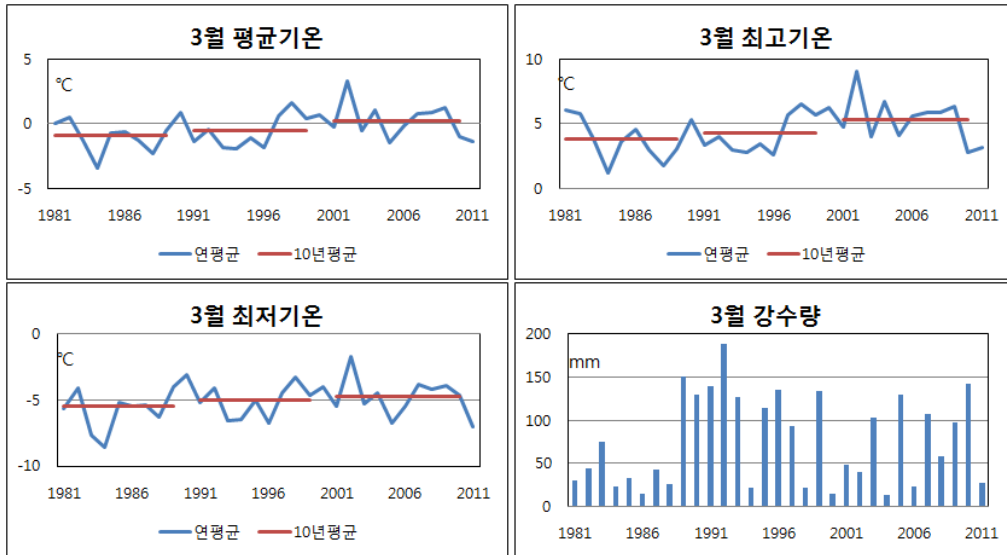
〈표 2.5〉에서는 강릉 지점의 2월의 10년 평균 기온과 강수량을 나타내었다. 대관령과 마찬가지로 기온값이 점점 상승하였다. 평균기온은 1980년대에 비해 2000년대에 약 2℃ 상승하였고, 최고기온은 약 1.9℃, 최저기온은 약 1.6℃ 상승하였다.

강수량은 1980년대에 약 61mm로 가장 높으며, 1980년대에 비해 2000년대에는 약 10mm가 감소하였다.

〈표 2.5〉 강릉 2월의 10년 평균 기온과 누적 강수량

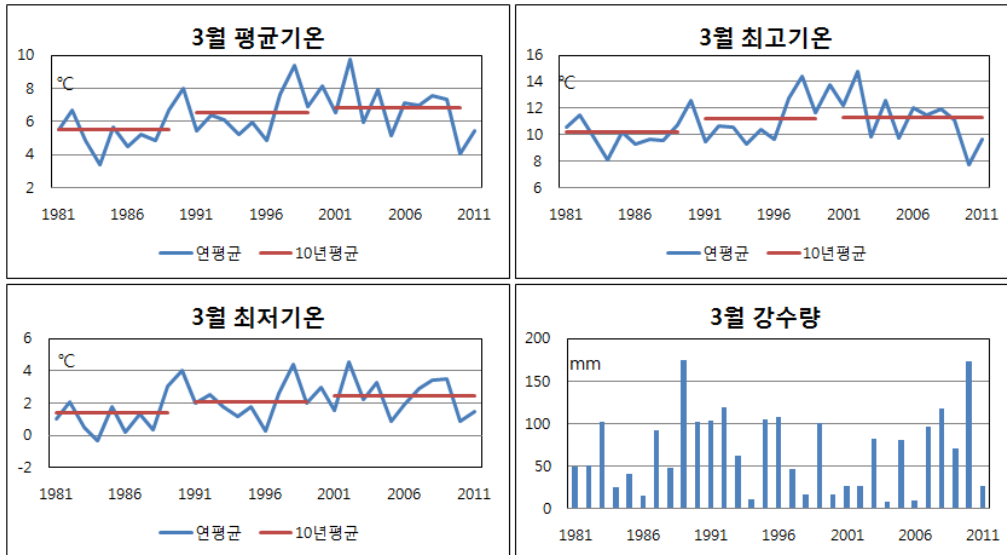
항목	1980년대	1990년대	2000년대
평균기온(℃)	0.98	2.33	2.94
최고기온(℃)	5.41	7.01	7.35
최저기온(℃)	-2.57	-1.75	-0.89
강수량(mm)	61.03	45.33	51.78

〈그림 2.7〉은 대관령 기상대 지점의 3월 평균 값을 나타낸 그래프로 평균기온, 최고기온, 최저기온 모두 상승하는 경향이 나타났다.



<그림 2.7> 대관령 기상대 지점의 3월 평균 기온과 누적 강수량

<그림 2.8>은 강릉 기상대 지점의 3월 평균 값을 나타낸 그래프로 대관령과 마찬가지로 상승하는 경향이 나타났다.



<그림 2.8> 강릉 기상대 지점의 3월 평균 기온과 누적 강수량

<표 2.6>에서는 대관령 지점의 3월의 10년 평균 기온과 강수량을 나타내었다. 기온 값은 2월과 마찬가지로 점점 상승하는 결과가 나타났고, 평균기온을 살펴보면 1980년대에 비해 2000년대에 약 0.4℃ 상승하여 영상의 기온을 나타내었으며, 최고기온은 약 1.5℃, 최저기온은 약 0.8℃ 상승하였다.

강수량은 1990년대에 약 99mm로 가장 높았으며, 1980년대에 비해 2000년대에 약 15mm 증가하였다.

<표 2.6> 대관령 3월의 10년 평균 기온과 누적 강수량

항목	1980년대	1990년대	2000년대
평균기온(℃)	-0.88	-0.52	0.28
최고기온(℃)	3.83	4.34	5.37
최저기온(℃)	-5.54	-5.04	-4.73
강수량(mm)	56.73	99.00	71.49

<표 2.7>에서는 강릉 지점의 3월의 19년 평균 기온과 강수량을 나타내었다. 기온값

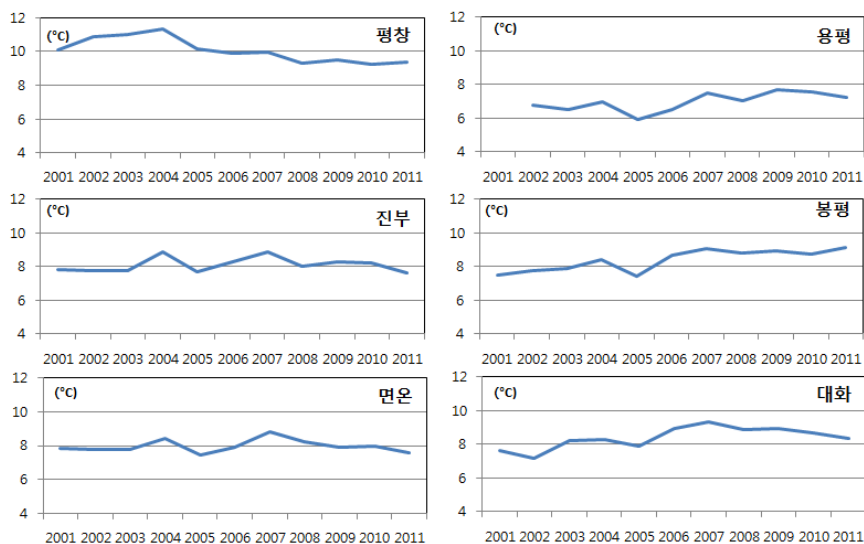
은 대관령과 마찬가지로 점점 상승하였다. 평균기온은 1980년대에 비해 2000년대에 약 1.3℃ 상승하였고, 최고기온은 약 1.3℃, 최저기온은 약 1.1℃ 상승하였다.

강수량은 1980년대에 약 69mm로 가장 높았으며, 1980년대에 비해 2000년대에는 약 5mm 줄어들었다.

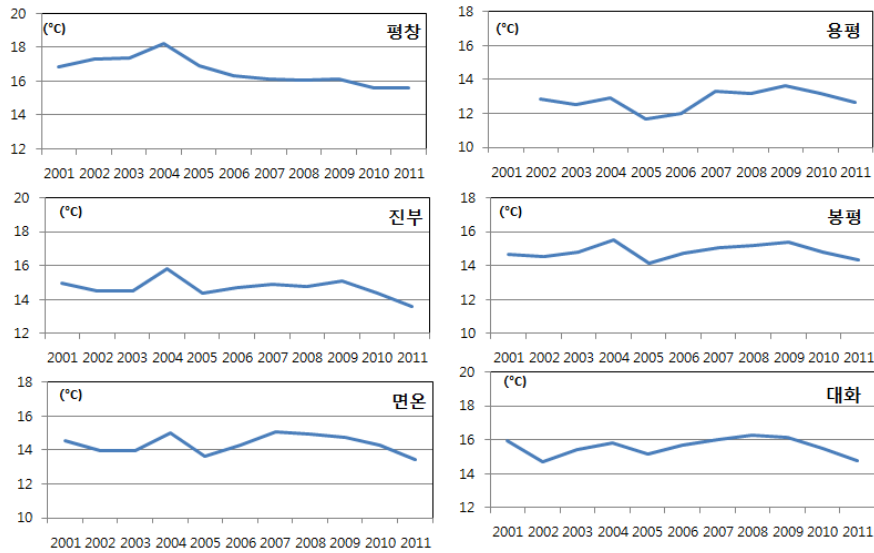
<표 2.7> 강릉 3월의 10년 평균 기온과 누적 강수량

항목	1980년대	1990년대	2000년대
평균기온(℃)	5.53	6.60	6.81
최고기온(℃)	10.19	11.28	11.40
최저기온(℃)	1.38	2.14	2.44
강수량(mm)	69.60	68.54	64.80

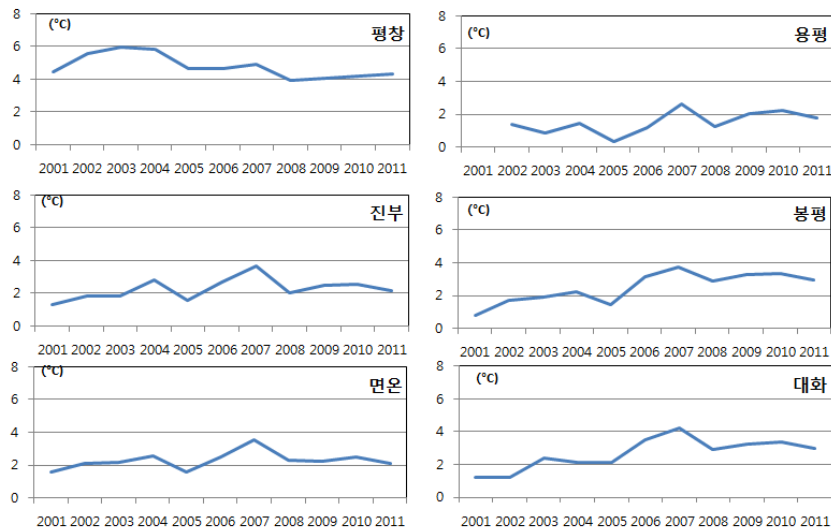
<그림 2.9>~<그림 2.16>은 평창과 강릉지역의 각 AWS 지점의 평균기온, 최고기온, 최저기온, 강수량을 나타낸 그래프이다. AWS자료의 경우는 기상대자료와 비교하여 기간이 짧기 때문에 시간 변화에 따른 변동성이 확연히 나타나지 않았다. 하지만 최저기온의 그래프를 보면 약간 상승하는 경향이 보였다.



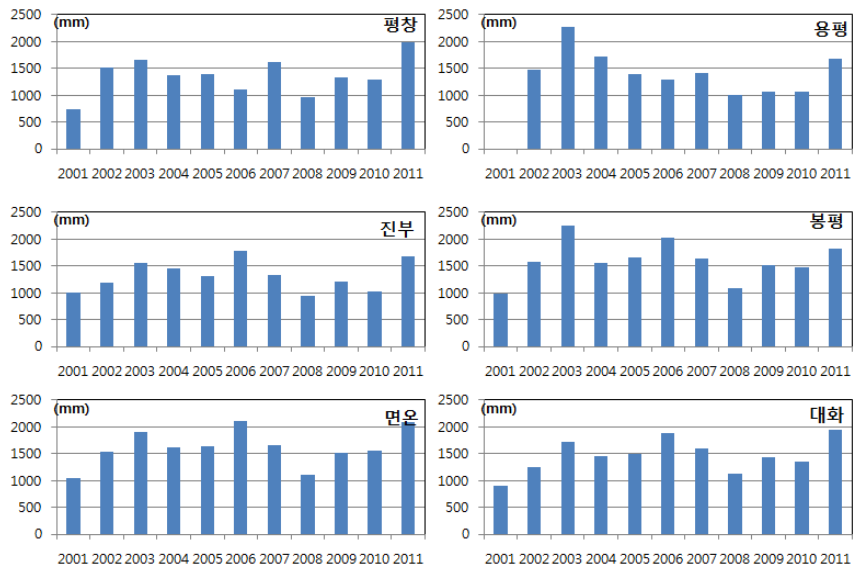
<그림 2.9> 평창지역 AWS 지점의 평균기온



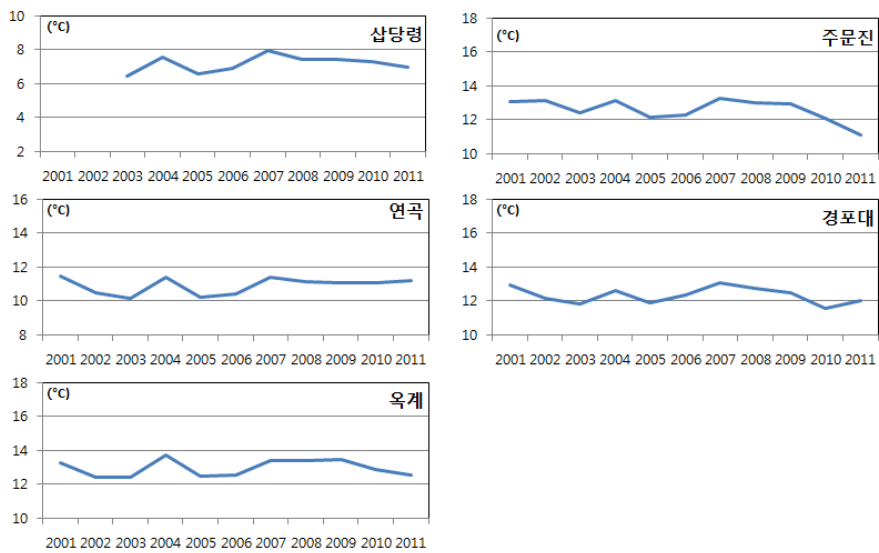
<그림 2.10> 평창지역 AWS 지점의 최고기온



<그림 2.11> 평창지역 AWS 지점의 최저기온



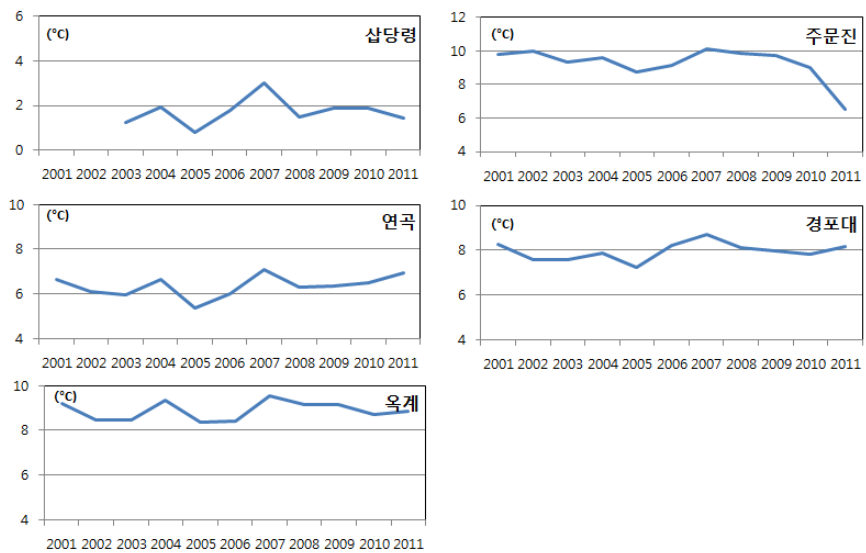
<그림 2.12> 평창지역 AWS 지점의 강수량



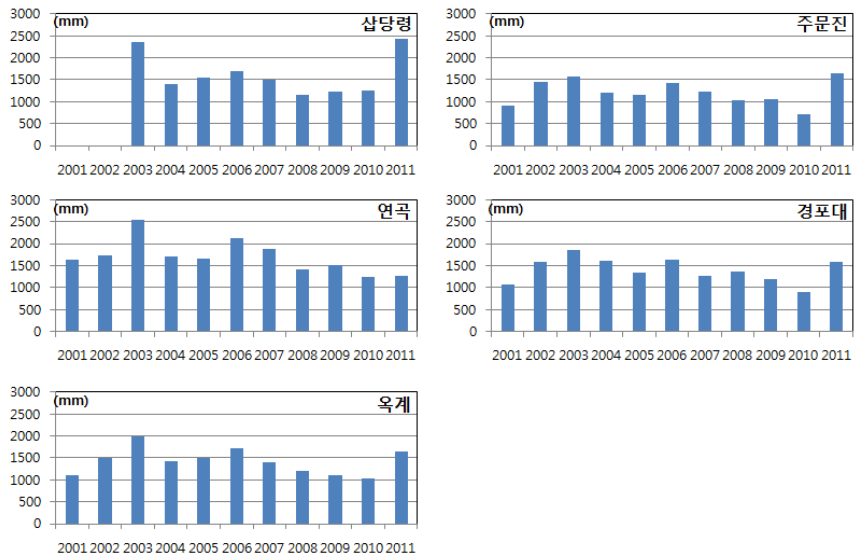
<그림 2.13> 강릉지역 AWS 지점의 평균기온



<그림 2.14> 강릉지역 AWS 지점의 최고기온



<그림 2.15> 강릉지역 AWS 지점의 최저기온



<그림 2.16> 강릉지역 AWS 지점의 강수량

<표 2.8>에서는 평창주변 6개 지점의 AWS의 결과를 2001년부터 2011년까지의 값을 평균 하여 나타내었다. 기온은 평창AWS지점이 가장 높았으며, 용평AWS지점이 가장 낮았다.

강수량은 면온AWS지점이 가장 높았고, 진부AWS지점이 가장 낮았다.

<표 2.8> 평창 주변 AWS의 2000년대 평균 기온과 누적 강수량

항목	평창	용평	봉평	진부	대화	면온
평균기온(℃)	10.08	6.97	8.38	8.10	8.38	7.97
최고기온(℃)	16.58	12.79	14.83	14.69	15.57	14.36
최저기온(℃)	4.77	1.50	2.49	2.27	2.67	2.28
강수량(mm)	1361.61	1435.60	1596.26	1312.68	1467.91	1615.50

<표 2.9>에서는 강릉 주변 5개 지점의 AWS의 결과를 2001년부터 2011년까지의 값을 평균하여 나타내었다. 기온은 옥계AWS지점이 가장 높았으며, 삽당령AWS지점이 가

장 낮았다. 삼당령AWS지점은 행정구역상 강릉에 속해있지만 지리적으로 태백산맥과 인접해있어 강릉보다는 평창의 기온과 비슷한 결과를 나타냈다.

강수량은 연곡AWS지점이 가장 높았고, 주문진AWS지점이 가장 낮았다.

〈표 2.9〉 강릉 주변 AWS의 2000년대 평균 기온과 누적 강수량

항목	삼당령	주문진	경포대	연곡	옥계
평균기온(℃)	7.17	12.61	12.33	10.91	12.97
최고기온(℃)	13.50	16.34	16.94	16.23	17.64
최저기온(℃)	1.71	9.27	7.96	6.35	8.87
강수량(mm)	1618.56	1219.24	1402.00	1700.39	1418.77



제3절 개최지 주변 기후변화 분석

1. 개최지 주변지역 계절변화

대관령과 강릉에 위치한 기상대의 1981년부터 2011년까지의 일 평균기온, 일 최고기온, 일 최저기온을 이용하여 개최지 주변 지역에 대해서 사계절 변화를 분석하였다. 사계절의 분석은 최광용 등(대한지리학회지, 2006)의 분석 방법을 이용하여 분석하였다. 분석 방법은 일 최저기온, 일 평균기온, 일 최고기온을 모두 합한 기온을 7일 이동 평균하여 반올림 한 값(Summed Daily Temperature, SDTi)을 산출하여 계절을 분석한다.

$$SDTi = \frac{\sum_{n=i-3}^{i+3} (Min T_n + Mean T_n + Max T_n)}{7}$$

계절구분은 <표 2.10>의 최광용 등(2006)이 분류한 계절구분에 따라서 분류한다.

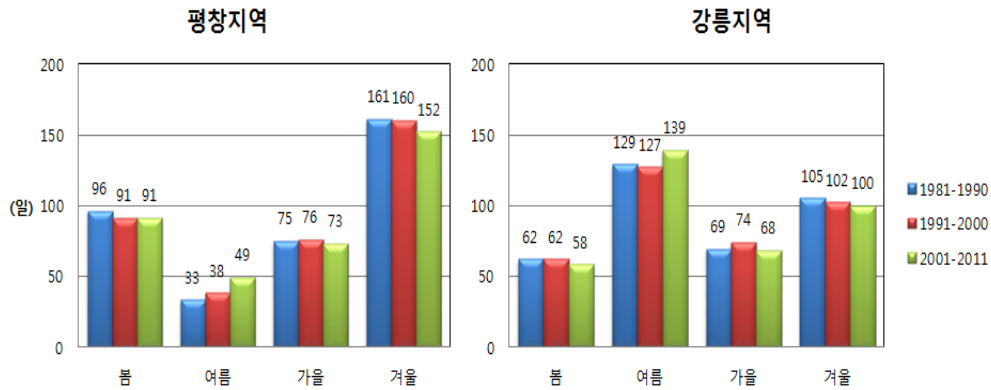
<표 2.10> 사계절 분류 기준

Seasonality	Season temperature indices
Winter end	Last record of SDTi <15°C
Spring onset	
Spring end	First record of SDTi ≥ 60°C
Summer onset	
Summer end	Last record of SDTi ≥ 60°C
Fall onset	
Fall end	First record of SDTi <15°C
Winter onset	

위의 방법에 따라 평창지역과 강릉지역의 계절변화를 살펴보았다<표 2.11>. 두 지역의 결과를 보면 사계절 중 여름이 각 각 16일과 10일이 증가하는 가장 큰 변화를 보였고 그 다음으로 겨울, 봄, 가을 순으로 각 계절의 일 수가 줄어들었다.

<표 2.11> 평창과 강릉의 계절 변화

지역	계절	1981-1990	1991-2000	2001-2011	비교
평창	봄	96일	91일	91일	-5
	여름	33일	38일	49일	+16
	가을	75일	76일	73일	-2
	겨울	161일	160일	152일	-9
강릉	봄	62일	62일	58일	-4
	여름	129일	127일	139일	+10
	가을	69일	74일	68일	-1
	겨울	105일	102일	100일	-5

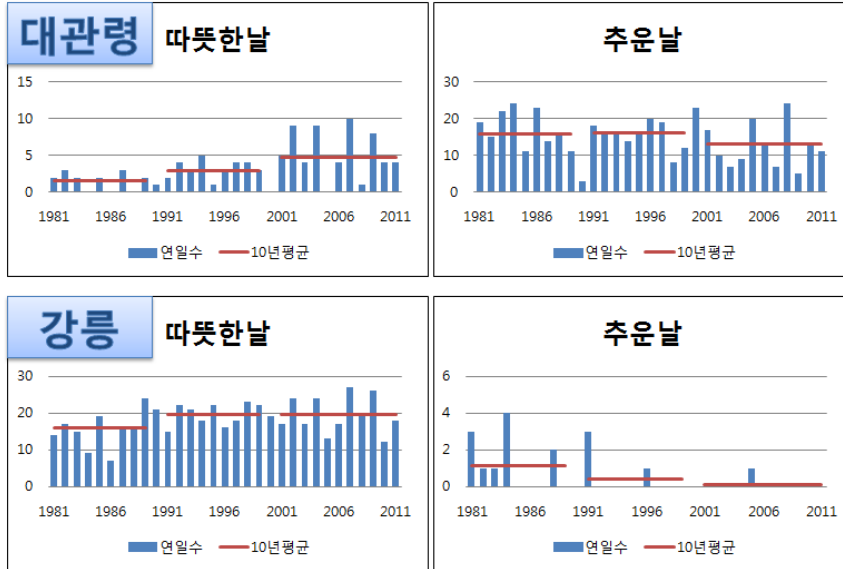


<그림 2.17> 개최지 주변 계절 변화

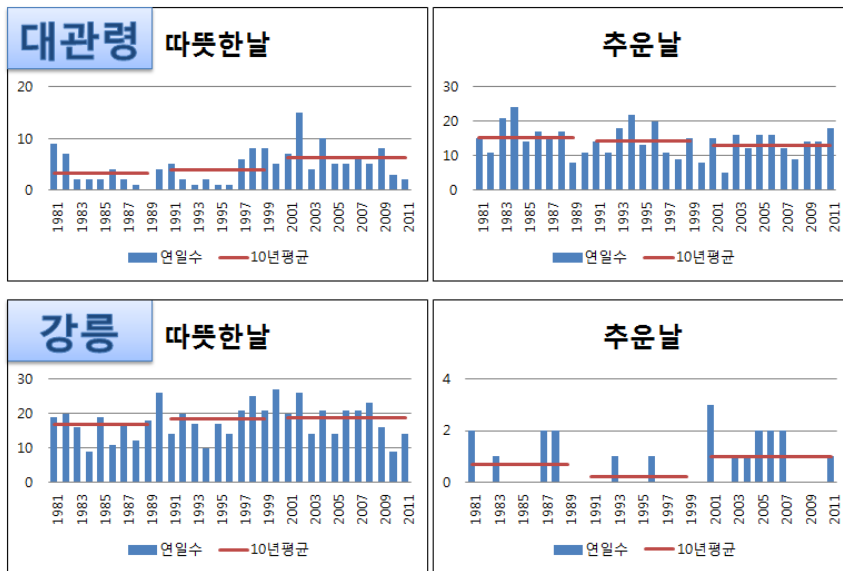
2. 올림픽 기간 기후변화 영향

올림픽이 열리는 2월과 3월의 기후변화를 알아보기 위해 1981년부터 2011년까지 대관령과 강릉 기상대의 기온자료를 이용하여 분석하였다. 2월에서는 일평균기온이 5°C 이상 되는 날, 3월에서는 10°C 이상이 되는 날을 따뜻한 날로 분류하였고, 2월에서는 -10°C 이하가 되는 날, 3월에서는 -5°C 이하가 되는 날을 추운 날로 분류하였다.

<그림 2.18>은 2월의 따뜻한 날과 추운 날의 일수 변화를 나타낸 그래프이다. 결과를 보면 대관령과 강릉 두 지역 모두 따뜻한 날의 일수가 증가하고 추운 날의 일수가 감소하였다. <그림 2.19>는 3월의 결과를 나타낸 그래프로서 따뜻한 날은 두 지역 모두 증가하는 추세가 나타났고, 추운 날의 경우는 강릉지역에 최근 10년간 평균값이 과거보다 더 높게 나타났다. 위의 기온변화와 비교했을 때 온도는 상승하고 있지만 추운 날이 더 많이 나타난 이유는 기후변화에 따른 악기상의 증가라고 볼 수 있다.



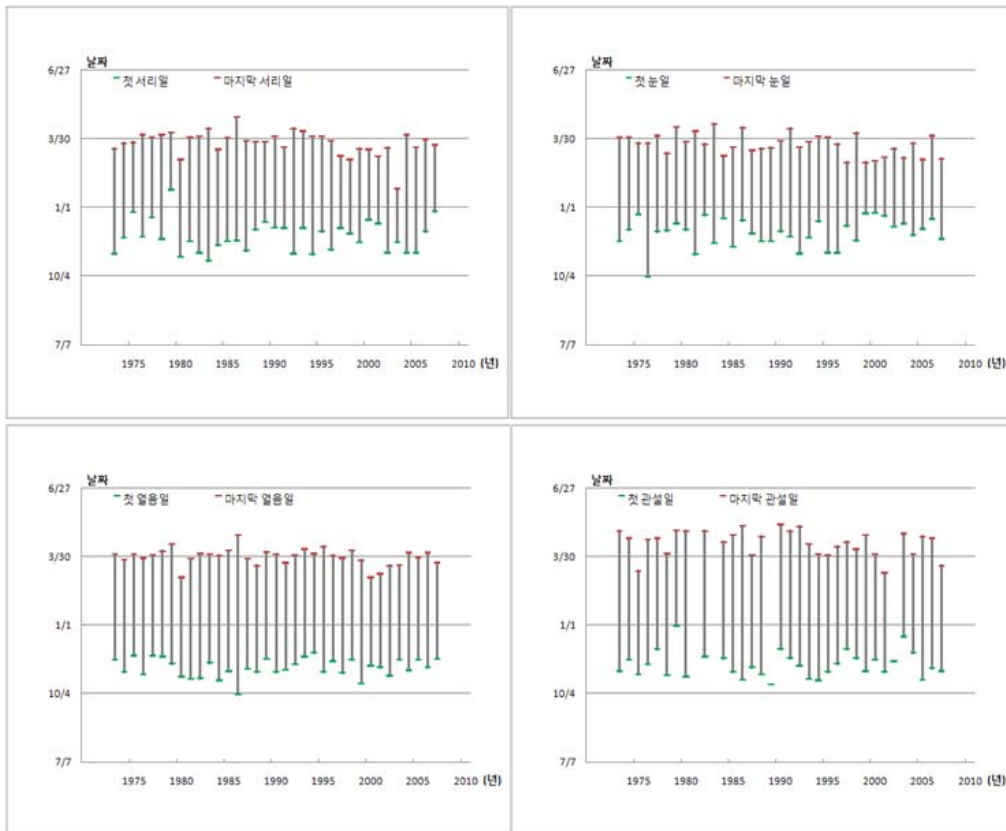
<그림 2.18> 대관령과 강릉의 2월 기후변화



<그림 2.19> 대관령과 강릉 3월 기후변화

3. 강릉지역의 기후 계절 변화

<그림 2.20>은 강릉지역의 기후 계절 변화를 나타낸 그래프로 왼쪽 위부터 차례대로 서리일, 눈일, 얼음일, 관설일을 나타내었다. 그래프를 보면 현상이 처음 나타나는 날짜가 최근으로 올수록 더 늦어지고 있으며, 마지막 현상이 나타나는 날짜가 앞당겨 지고 있다. 이는 앞서 말한 각 지역에서 겨울이 줄어드는 현상과 일맥상통한 결과라고 볼 수 있다.



<그림 2.20> 강릉지역 기후 계절 변화



제4절 기후변화 인식조사

1. 설문 조사 방법

1.1 설문조사 목적

올림픽 개최지 주변 일반 주민에 대한 기후변화와 동계올림픽 영향 등에 인식 등을 파악하기 위해 설문조사를 실시하였으며, 대상은 평창군과 강릉시내 거주하는 일반시민을 대상으로 하였다.

본 설문조사는 2018평창동계올림픽이 개최되는 주변 일반 주민들에 대해 기후변화에 대한 일반사항과 인식정도 및 교육여부와 올림픽 개최의 영향 등에 대한 조사로 이는 올림픽 개최를 위해 각종 경기 및 편의시설의 건설 및 유지관리에 대해 지역경제 기여도에 대한 인식과 더불어 환경적 측면에서 올림픽개최 계획을 어떻게 인식하고 있는지에 대한 설문으로 이는 환경올림픽 개최에 대한 개최지 주변 지역민에 대한 인식 및 올림픽 계획에 대한 기후변화 대응 정책방향 제시 등의 기초 자료를 구축하고자 실시하였다.

1.2 설문조사 설계 및 방법

○ 조사대상

- 개최지 주변 거주 시민 137명 조사

○ 조사방법 : 설문지를 통한 면접조사

- 면접요원에 의한 1:1 면접 조사

○ 조사기간 : 2012년 11월 16일부터 20일까지

○ 표본추출

- 평창군 : 66명, 강릉시 :71명

○ 분석 방법

- 수집된 자료의 coding을 거쳐 SPSS 통계 프로그램 이용 분석

○ 조사내용

- 기후변화 일반 현황
- 지역 기후변화 인지도 분석
- 동계올림픽 개최 영향

1. 기후변화 일반	◦ 기후변화와 지구온난화문제 인지 여부
	◦ 기후변화와 지구온난화 문제 인지 경로
	◦ 기후변화의 위험 인지 여부
	◦ 분야별 기후변화 영향에 대한 인지
2. 지역 기후변화 인지도 분석	◦ 기후변화 진행에 대한 인지도
	◦ 기후변화나 지구온난화 지역 산업경제 영향 인지도
	◦ 기후변화에 의한 생활 어려움 인지도
	◦ 향후 기후변화의 피해 인식
	◦ 지역 기후변화를 위해 필요한 지방자치단체의 정책
3. 동계올림픽 개최 영향	◦ 환경올림픽 계획 인지 여부
	◦ 올림픽 개최로 인한 기후변화, 지구온난화 진행 속도 인지도
	◦ 환경올림픽계획 지역적인 영향 인지도
	◦ 환경올림픽계획 전지구적 영향 인지도
	◦ 환경올림픽보다 경제성올림픽 준비여부

○ 설문지

지역 기후변화 인식 및 올림픽 영향에 관한 설문조사

본 설문은 “동계올림픽 개최지 주변 기후변화 영향 예측 및 모니터링 계획 수립”을 위한 연구의 일환으로써, 올림픽 개최지 주변 지역민의 기후변화 인식조사 및 올림픽 개최에 따른 기후영향에 대한 설문조사입니다.

본 설문에 응해주신 분들을 대상으로 본 연구결과(보고서) 및 설문결과(분석결과)를 공유토록 하겠습니다. 응답내용은 통계법 “제33조 비밀의 보호” 조항에 의해 엄격히 비밀로 보호되며, 본 연구목적외로만 사용할 것을 약속드립니다.

- 조사기관 : 한국기후변화대응연구센터
- 연구책임 : 이상신 책임연구원
- 조사문의 : 033-254-2103

「통계응답자의 의무 및 보호에 관한 법률」

제33조 (비밀의 보호)

- 1) 통계의 작성과정에서 알려진 사항으로서 개인이나 법인 또는 단체 등의 비밀에 속하는 사항은 보호되어야 한다.
- 2) 통계의 작성을 위하여 수집된 개인이나 법인 또는 단체 등의 비밀에 속하는 자료는 통계작성 외의 목적으로 사용되어서는 아니된다.

※ 응답요령 : 해당되는 번호에 O, V 로 표시해 주시고, 기타 의견은 ()에 기록해주시기 바랍니다.

1 기후변화 일반

- Q1 귀하께서는 최근 기후변화와 지구온난화 문제의 심각성에 대해 들어본 적이 있으니까? (예 / 아니오)
- Q2 귀하께서는 기후변화와 지구온난화 문제에 관한 내용을 어떤 경로를 통해 들어보셨습니까?(복수응답)
 ① TV ② 신문 ③ 인터넷 ④ 관련 강좌 ⑤ 공공기관 홍보물
 ⑥ 공공기관 행사 ⑦ 기후변화 홍보사설 ⑧ 기타()
- Q3 기후변화는 인류의 삶에 큰 위협을 미친다고 생각하십니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q4 기후변화의 영향은 어떤 것들이 있다고 생각하는가?(복수응답)
 ① 평균기온상승 ② 해수면상승 ③ 폭우/폭설/가뭄 ④ 생태계변화
 ⑤ 농작물변화 ⑥ 열대우림과파괴 ⑦ 기타()
- Q5 기후변화의 원인은 무엇인지 알고 있는 것들을 모두 적어주세요.
- Q6 기후변화대응을 위한 방안들 중 본인이 실천 가능한 것은 어떤 것들이 있는지 모두 적어주세요.

3 동계올림픽 개최 영향

- Q1 귀하께서는 환경올림픽 개최에 대해 어느정도 알고 계십니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q2 올림픽 개최로 인해 개최지 주변 기후변화나 지구온난화 진행 속도가 더욱 빨라질 것이라 예상하십니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q3 귀하께서는 환경올림픽개최들이 전지구적 영향보다 지역적으로 더 영향을 미칠 것으로 생각하십니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q4 (3)번 문항에서 전지구적 영향(온실가스 저감에 따른 지구온난화 지연)에 어느 정도 영향을 미친다고 생각하십니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q5 귀하께서는 기후변화나 지구온난화 지연을 위한 환경올림픽 개최보다 경제성에 더 무게를 두고 올림픽을 준비해야한다고 생각하십니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q6 환경올림픽 개최를 위해 일반시민의 입장에서 제안하고 싶은 내용이 있다면 자유롭게 서술해 주세요.

2 지역 기후변화 인지도 분석

- Q1 귀하께서 거주하고 계신 지역은 기후변화가 진행되고 있다고 생각하십니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q2 기후변화나 지구온난화가 지역 산업경제 전반에 영향을 미칠 것이라 생각하십니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q3 기후변화에 의해 귀하의 생활에 어려움이 느낀적이 있으니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q4 향후 기후변화가 귀하의 생활 전반에 피해를 일으킬 것이라 생각하십니까?
 ① 전혀아니다 ② 아니다 ③ 보통이다 ④ 그렇다 ⑤ 매우그렇다
- Q5 지역 기후변화 대응을 위해 필요한 지방자치단체의 정책 중 가장 중요한 것은 무엇이라 생각하십니까?
 ① 온실가스 감축정책 ② 기후변화 적응역량강화
 ③ 녹색기술개발 및 산업육성 ④ 녹색도시 및 녹색교통
 ⑤ 녹색일자리 창출 ⑥ 기후변화 교육 및 홍보
 ⑦ 기타()
- Q6 기후변화나 지구온난화를 직접 실감하고 계시다면 어떤 현상을 느끼고 계시는지 모두 적어주세요.
 ()
 * 예) 열대야, 해안선변화나 해안침식, 아열대 기후화(스플룽), 농작물 작황변화, 어획량의 변화, 가뭄증가, 생물종의 변화 등

4 통계처리분항

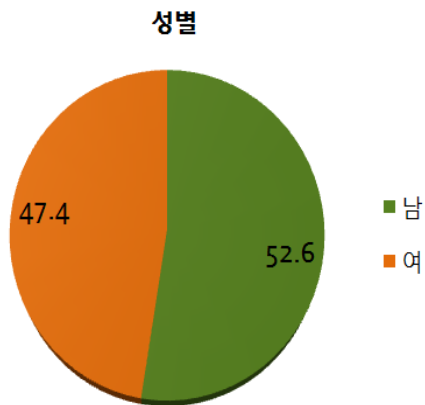
- Q1 귀하의 성별은?
 ① 남성 ② 여성
- Q2 귀하의 연령대는?
 ① 20대 ② 30대 ③ 40대 ④ 50대 ⑤ 60대 ⑥ 70대 이상
- Q3 귀하의 학력은
 ① 중졸이하 ② 고졸 ③ 대졸이상
- Q4 귀하께서는 기후변화나 환경관련 교육에 연간 어느정도 참여하십니까?
 ① 없다 ② 8시간이하 ③ 16시간이하 ④ 32시간이하
 ⑤ 64시간이하 ⑥ 64시간이상
- Q5 귀하의 직업은?
 ① 학생 ② 사무직 ③ 생산기술직 ④ 농축산업 ⑤ 자영업
 ⑥ 공무원 ⑦ 전업주부 ⑧ 서비스직 ⑨ 기타

설문에 응해주셔서 진심으로 감사드립니다.
 설문결과는 비공개로 연구결과에 반영되며, 지역 및 동계올림픽의 성공적 개최를 위해 분석결과만 공개됩니다.
 한국기후변화대응연구센터 이상신 책임연구원

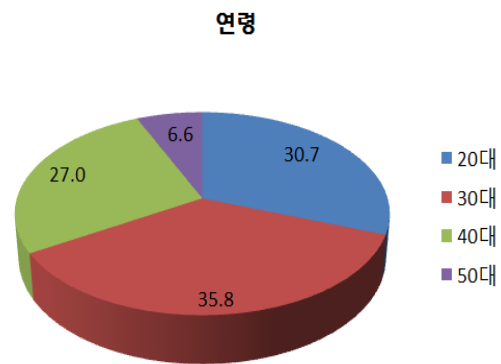
2. 인식조사 결과

1.1 설문 응답자 일반현황

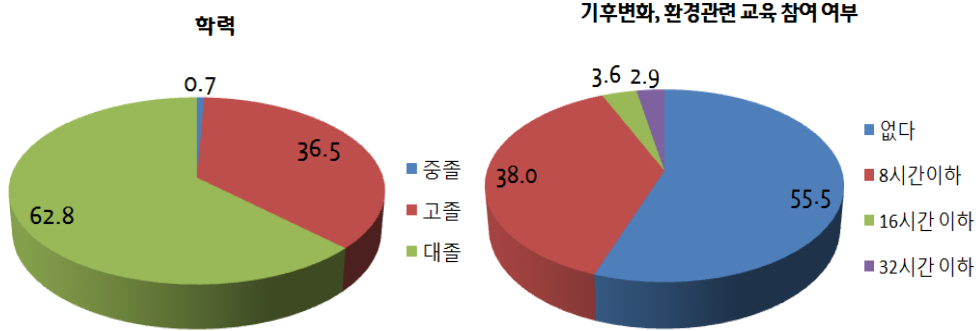
개최지 주변 시민 17명(평균 : 66명, 강릉 : 71명)을 대상으로 한 설문결과를 분석하기 위해 응답자 특성을 살펴보면 <그림 2.20>과 같이 남녀 비율을 50%에 근접하게 조사를 실시하였으며 20대와 30대위주의 조사가 되었다. 또한, 60% 이상의 응답자가 대졸 이상의 고학력자로서 지역에 대한 기후변화 및 환경과 관련한 올림픽 계획 홍보의 효과가 클 것을 짐작할 수 있다. 하지만 응답자의 55% 이상이 기후변화나 환경관련 교육 참여 기회가 주어지지 않아 올림픽 계획을 수립하면서 지역민에 대한 교육 홍보에 대한 정책적 지원이 필요할 것으로 판단되었다. 응답자의 직업군은 사무직과 서비스직의 비율이 상대적으로 높았으며 다음으로 자영업 순으로 나타났다.



<그림 2.21> 응답자 현황

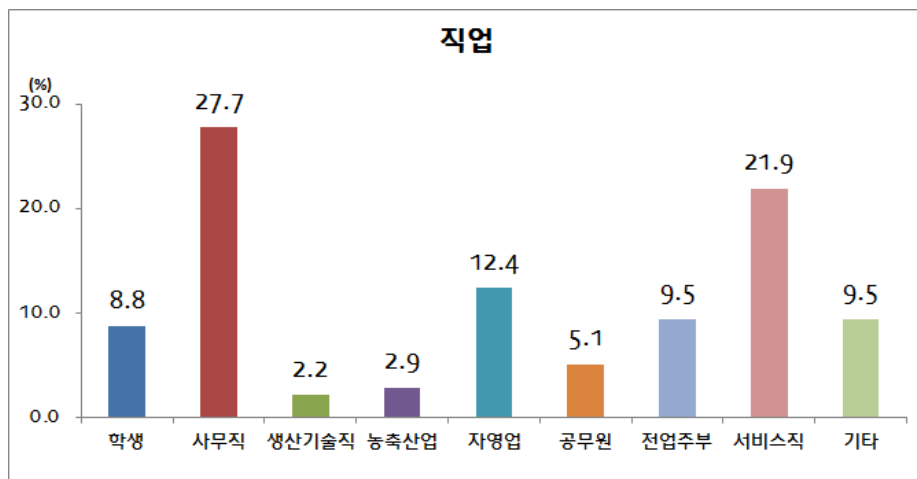


<그림 2.22> 연령 분포



<그림 2.23> 응답자 학력

<그림 2.24> 관련 교육참석 여부



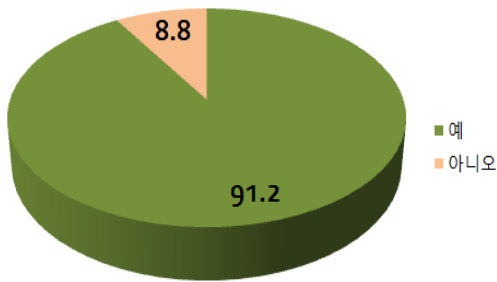
<그림 2.25> 응답자 직업분류

1.2 기후변화 일반

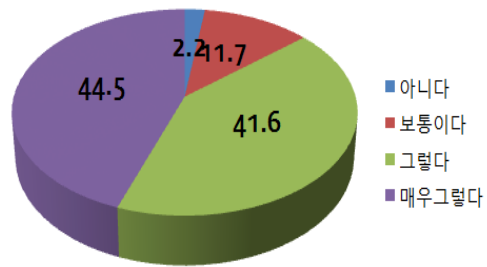
개최지 주변 일반시민을 대상으로 기후변화 일반적인 사항에 대한 설문을 실시한 결과로서 전체 응답자 중 91.2%가 기후변화와 지구온난화에 대한 문제를 인식하고 있는 것으로 나타나 응답자의 대부분이 기후변화가 지역에 영향을 미치는 것으로 인식하고 있었다. 또한 그 영향도 2.2%를 제외하고 위험요인으로 인식하고 있어 이에 대한 구체

적 사항에 대해 인지하고 있음을 알 수 있었다. 하지만 기후변화 문제 인지 경로는 대부분 언론을 통해 교육받고 있는 실정이어서 지역이나 올림픽에 미칠 영향에 대한 정보를 가지고 있지 않은 것으로 판단되었다. 또한 기후변화의 영향을 묻는 질문에 대한 복수 응답에서는 대부분 기온상승과 해수면 상승, 재해에 대해 영향을 미친다고 알고 있었다.

기후변화와 지구온난화문제 인지 여부

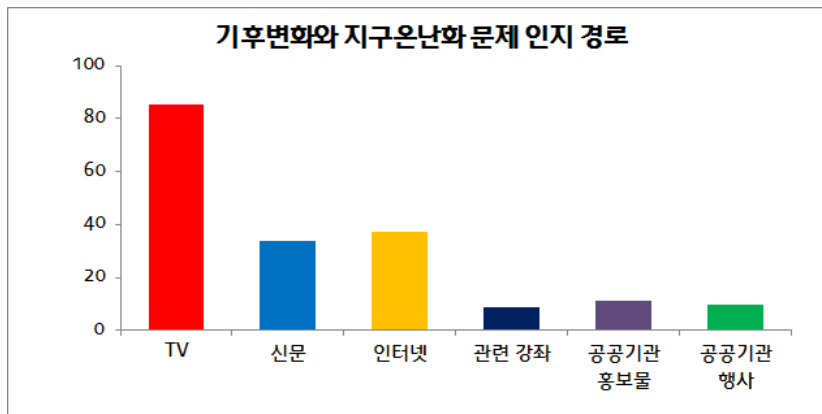


기후변화의 위험 인지 여부

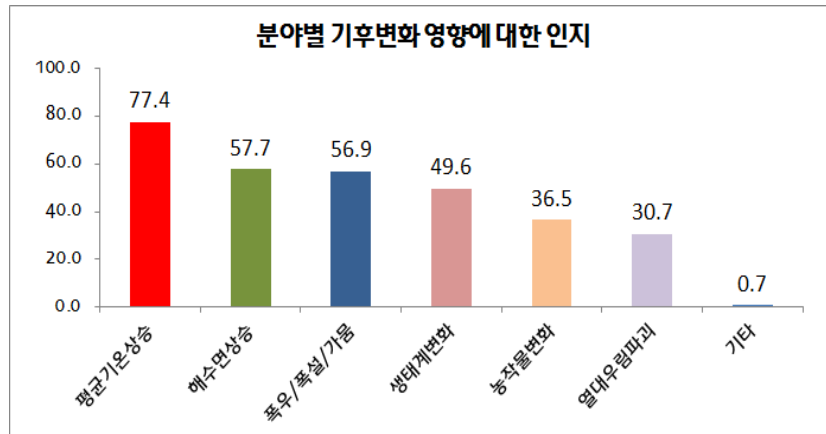


<그림 2.26> 기후변화 문제 인지 여부

<그림 2.27> 기후변화 위험 인지 여부



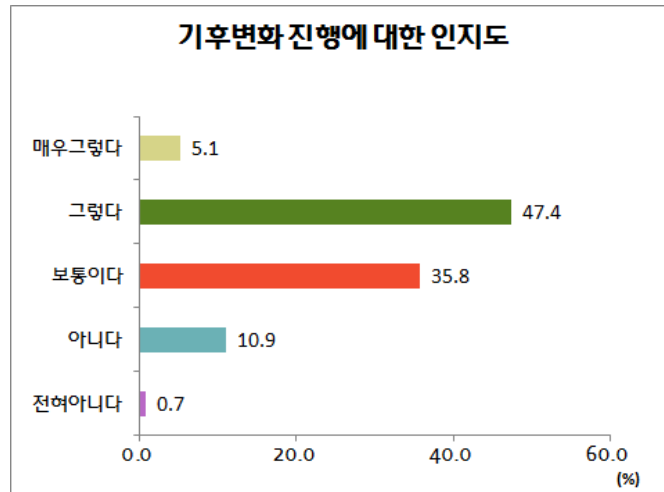
<그림 2.28> 기후변화 문제 인지 경로



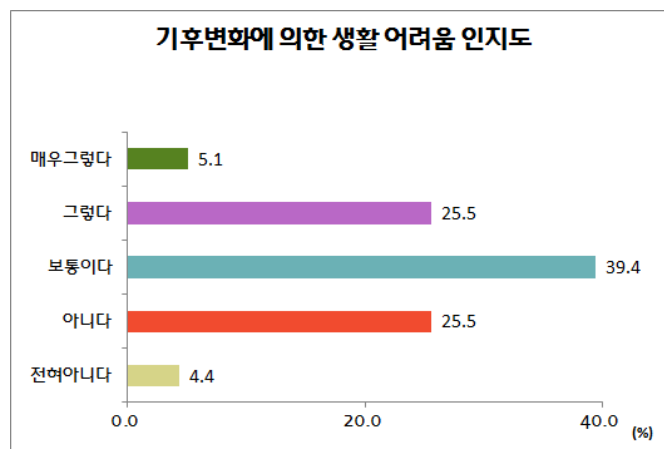
<그림 2.29> 분야별 기후변화 영향 인지

1.3 지역 기후변화 인지도 분석

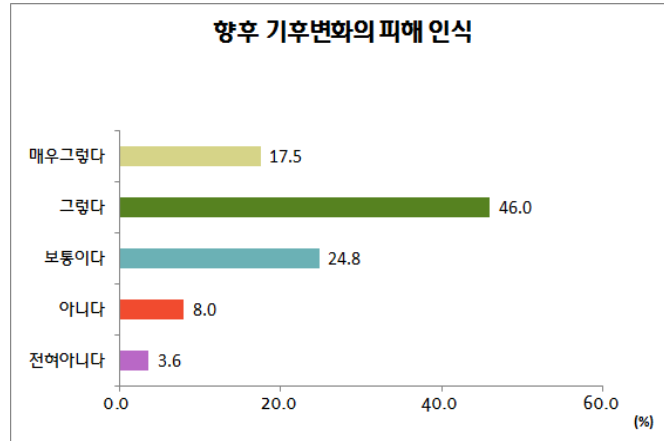
다음으로 지역기후변화에 대한 개최지 주변 지역민의 인지도에 대한 조사를 실시하였다. 그 결과 기후변화가 진행되고 있음을 12%의 응답자를 제외하고는 인지하고 있었으며 70% 이상의 응답자가 기후변화에 의해 보통정도 이상 실생활에 영향을 받아 어려움이 느끼고 있는 것으로 파악되었다. 여기에 더해서 향후 어려움이 더할 것으로 인식하는 비율은 90%에 가깝게 상승함에 따라 올림픽 계획을 비롯하여 지역의 기후변화 대응 정책이 필요함을 알 수 있었다. 지역 기후변화 대응을 위한 정책으로는 온실가스 감축 및 기후변화 적응역량 강화를 선택하였으나 27%의 응답자가 기후변화에 대한 교육 및 홍보와 관련된 정책의 필요성을 선택함으로써 올림픽 계획을 수립해 나가면서 지속적으로 지역민에 대한 환경 및 기후변화 교육과 홍보가 필요함을 알 수 있었다.



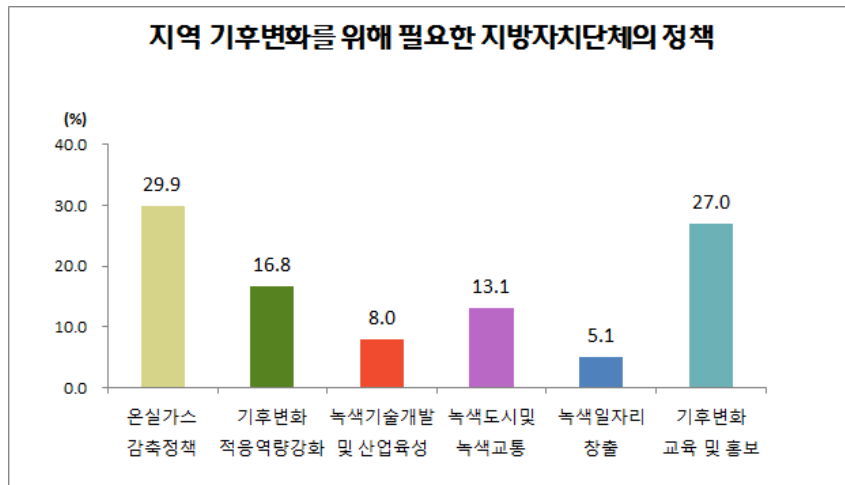
<그림 2.30> 기후변화 진행 인지정도



<그림 2.31> 기후변화 영향에 의한 생활고 여부



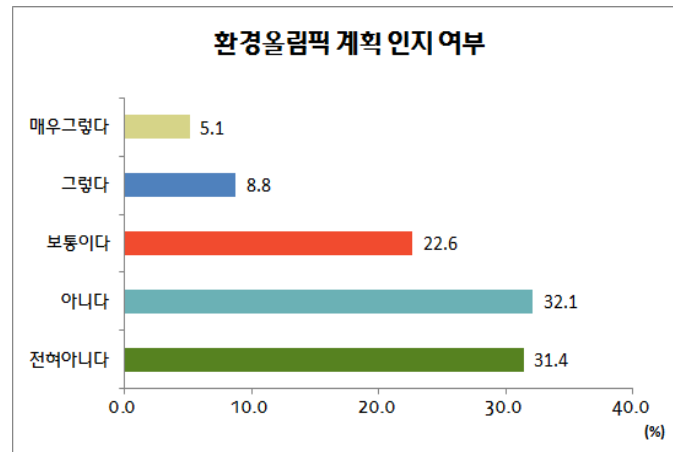
<그림 2.32> 기후변화 피해 예상 정도



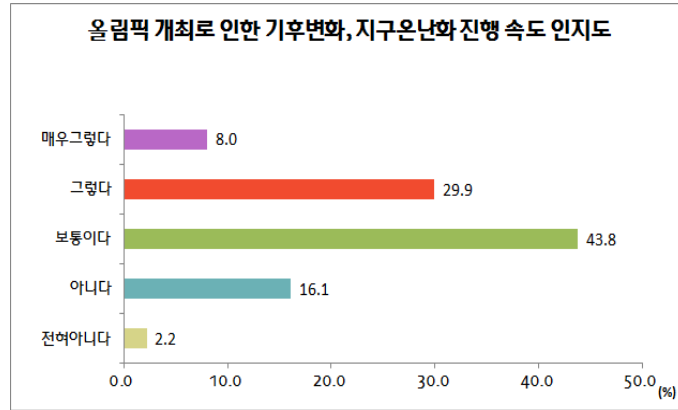
<그림 2.33> 지역 기후변화 대응을 위한 지자체 필요 정책

1.4 동계올림픽 개최영향

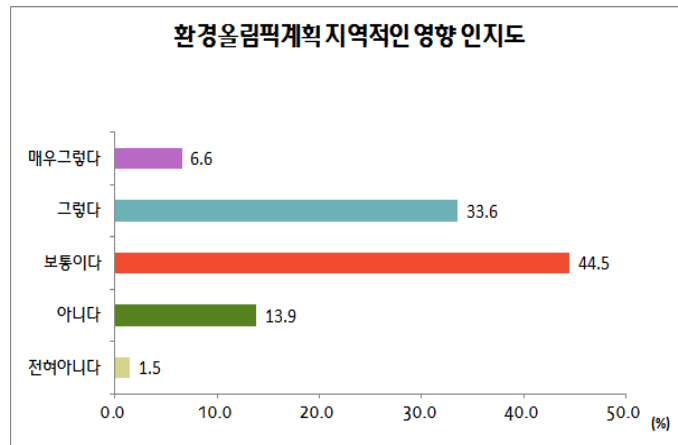
동계올림픽 계획과 관련된 설문에서는 현재 진행되고 2018평창동계올림픽 계획 중 환경분야 계획과 이에 따라 환경올림픽을 지양하고 있는 지에 대한 내용에서는 85%의 응답자가 환경보다는 지역경제 등에 우선한 올림픽을 생각하고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 이 설문조사에서 보듯이 지역민에 대한 환경올림픽 계획과 기후변화 대응 올림픽에 대한 교육과 홍보 필요성을 다시 확인할 수 있었다. 다음으로 올림픽 개최로 인한 기후변화 진행속도의 가속화 우려에 대해 80% 이상의 응답자가 보통이상으로 올림픽 계획이 기후변화를 가속시킬 것으로 내다봤다. 따라서 2018평창동계올림픽이 기후변화에 최소화한 영향을 미치기 위한 노력들에 대한 검토와 기수립된 계획에 대한 홍보가 필요해 보인다. 환경올림픽계획이 지역 기후변화와 전지구적 기후변화에 영향을 미치는 지에 대한 설문에서는 지역에 더 많은 영향을 미칠 것으로 응답함으로써 환경올림픽 계획이 전지구적 영향과 더불어 지역을 위한 계획임을 홍보하게 되면 지역민의 호응을 얻기가 수월해 질것으로 판단된다. 마지막으로 지역민들은 올림픽계획이 환경보다는 경제올림픽에 초점을 맞추어 준비되고 있는 것으로 판단하고 있었다.



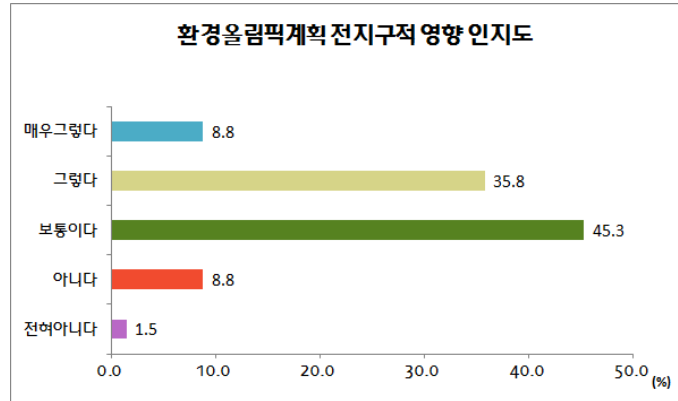
<그림 2.34> 환경올림픽 계획에 대한 인지여부



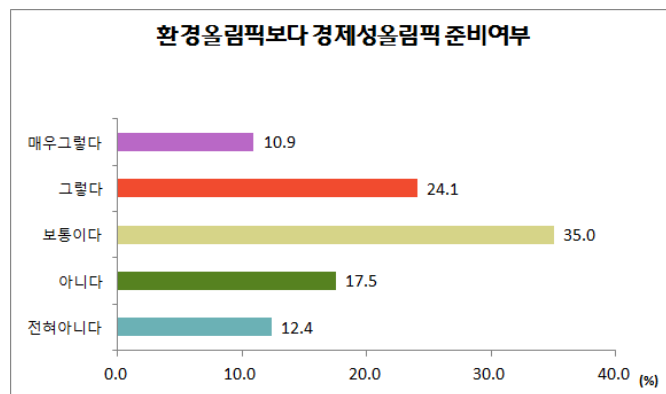
<그림 2.35> 올림픽 개최가 기후변화에 미치는 영향



<그림 2.36> 환경올림픽의 지역적 영향인지



<그림 2.37> 환경올림픽계획의 전지구적 영향



<그림 2.38> 올림픽계획의 환경과 경제 중심 판단

제 3 장

기후변화 전망

제 1 절 기후변화 시나리오

제 2 절 신기후변화 시나리오

제 3 절 개최지 주변 기후변화 시나리오 전망

제 3 장

기후변화 전망



제1절 기후변화 시나리오

기후변화에 대한 예측과 그 영향에 대한 연구의 근본목적은 기후변화와 연관된 분야 즉, 넓게는 기상에서 임상병리학 까지 산림과 같은 식생에서 농작물까지 그리고 수자원에서 미시경제학까지의 영향을 파악하여 예측하므로 우리에게 예견된 미래를 설계 하도록 하는 것이 그 목적 이며, 기후변화 예측은 과거의 관측자료 분석에 의한 경험적 통계방법과 GCM 같은 수치모델을 이용하는 방법으로 크게 나누며, 현재 약 20년 전부터 선진국에서 GCM을 이용한 온실기체 증가에 기인하는 기후변화에 대한 예측을 실시하여 온 바 있으며, 기후시나리오는 인간에 기인한 잠재적 영향을 조사하는데 사용되기 위해서 구성된 미래기후의 표현이다. 세계 각국에서 기후변화에 관한 보고서는 정부 간 기후변화 협의체(IPCC)에서 작성되며, IPCC는 1988년 설립된 이래 세 차례 (1990, 1995, 2001)의 평가 보고서를 발행하였으며, 2007년에는 제4차 보고서를 발간 하였다. 2013년 5차 보고서 발간 될 예정이다.

〈표 3.1〉 IPCC 발간 기후변화 평가보고서

IPCC 보고서	발간연도	영문약어
1차	1990	FAR
2차	1995	SAR
3차	2001	TAR
4차	2007	AR4

IPCC 기후시나리오의 개발은 working group I의 기후변화 과학에 관한 평가, working group II에서는 기후변화의 영향, 적응, 취약성 평가, working group III에서는 배출시나리오를 전담하고 있다.

IPCC에서는 인구 통계 및 사회 경제적 발달 등에 따른 온실가스 농도의 변화를 예측하여 온실가스 배출 시나리오를 제공하고 제공 하고 있다. IPCC의 특별보고서로부터 SRES(Special Report on Emission Scenarios) 시나리오를 발표하고 있다. 시나리오는 1995년 2차 보고서에서 SAR(1995) IS92 scenarios로, 2001년 3차보고서에서 TAR(2001)SRES scenarios로, 2007년 4차보고에서 AR4(2007) SRES scenarios로 발전시켜 오고 있다. 이러한 배출 시나리오를 기반으로 전 세계 기관에서 기후전망을 예측하고 있다.

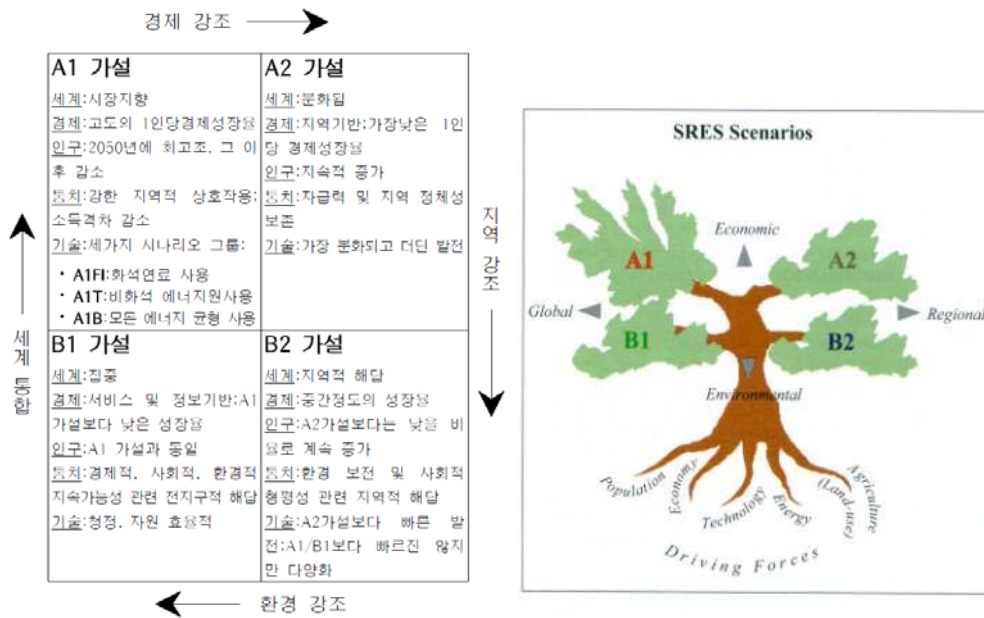
FAR의 배출시나리오는 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, CFCs, CO, NOx) 기체들의 2100년 까지의 배출을 포함하는 것으로, 경제성장과 인구는 네 가지 시나리오(A, B, C, D)에서 동일하게 가정되고, business-as-usual 시나리오(시나리오 A)하에서 에너지 공급이 석탄에 집중되어 있으며, 2100년까지 대기 중 CO₂ 배출 농도가 6.84Wm⁻²로 될 것으로 예상하는 시나리오이며, 시나리오 B는 온실가스 배출 억제가 낮은 시나리오로 2100년 까지 대기 중 CO₂ 배출 농도가 4.43Wm⁻²로 될 것으로 예상 하였다. 시나리오 C는 2100년 까지 3.624Wm⁻²의 배출을 예상 하였으며, 시나리오 D는 2.904Wm⁻² 까지 될 것으로 예상 하였다.

SAR에서 사용된 IS92 시나리오(IS92a ~ f)들은 1990년부터 2100년에 대하여 인구와 경제성장, 토지이용도, 기술변화, 에너지 활용도, 연료혼합물에 관한 가정에 기초를 두고, 온실기체와 에어로솔 전구물질의 범위를 달리 하였다. IS92a 시나리오는 2100년에 전 세계 인구를 113억, 2.3%의 경제성장, CO₂ 배출 농도 733ppm 을 예상한 시나

리오이며, IS92c시나리오는 2100년에 전 세계 인구는 64억, 경제성장은 1.2%증가, CO₂ 배출 농도는 485ppm이고, IS92e 시나리오는 2100년까지 전 세계인구 113억, 경제성장 3.0%, CO₂ 배출 농도는 986ppm으로 예상한 시나리오이다.

1996년 IPCC는 IS92시나리오를 대체하는 새로운 시나리오를 개발하기 시작하여, TAR이후부터 사용되어 오고 있으며, A1, A2, B1, B2의 네 가지 SRES배출 시나리오군을 개발하여, 미래의 온실가스와 황산염 에어로솔을 인구통계, 경제, 기술적 측면에서 다루며, 이중 A1 시나리오는 저인구 성장에 기초한 고도 경제성장 시나리오로 세계지역간의 벽은 축소되고, 지역간의 사회구조 1인당 소득도 점차 어느 방향으로 수렴되는 사회를 기술하며, 에너지에서의 기술 변화 방향성에 의해 경제의 급속한 성장, 최고의 지구촌 인구, 기술의 급속한 발전을 가정하며, 에너지 시스템의 기술변화 대응 방안에 따라 화석의 존형 시나리오로서 2100년까지 대기 중 CO₂ 배출 농도가 970ppm을 예상하는 시나리오(A1F1), 자원균형 형으로 2100년까지 CO₂ 배출 농도 540ppm을 예상하는 시나리오(A1B), 비화석형 연료형으로써 2100년까지 CO₂ 배출 농도가 720ppm을 예상하는 시나리오(A1T)의 3개 그룹으로 나누고 있다.

A2 시나리오는 지역주의가 높은 시나리오로서 각 지역은 블록화하고, 인구의 지속적 증가하여 세기말 약 150억 정도를 가정하고, 경제발달이 느리고, 기술 진보도 상대적으로 느린 세계를 설명하는 것으로 2100년까지 CO₂ 배출 농도가 830ppm을 예상하는 시나리오이며, B1 시나리오는 지구 인구의 경우 A1과 같지만 부가적인 기후 이니셔티브 없이 개선된 형평성을 포함하여, 경제, 사회, 환경 분야의 지속 가능성에 대한 전 지구적 해결점을 강조하는 시나리오로서, 2100년 CO₂ 배출 농도가 550ppm을 예상한다. B2 시나리오는 인구와 경제성장이 A1과 B1의 중간 단계정도이며, 경제적, 환경적, 사회적 지속 가능성에 대한 지역적 해결을 강조하며, 2100년 CO₂ 배출 농도가 600ppm을 예상한 시나리오이다.

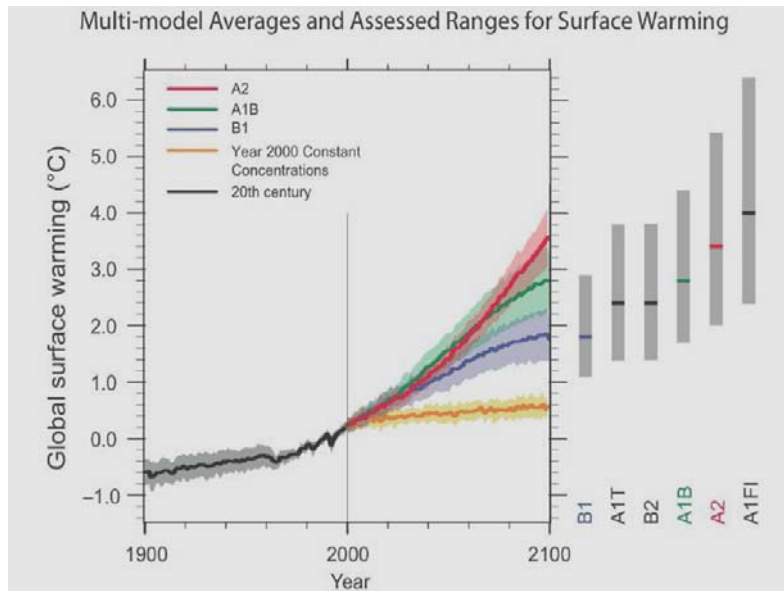


<그림 3.1> SRES 시나리오 개요

<표 3.2> 온실가스 배출시나리오의 배출인자별 특성 비교(Tar)

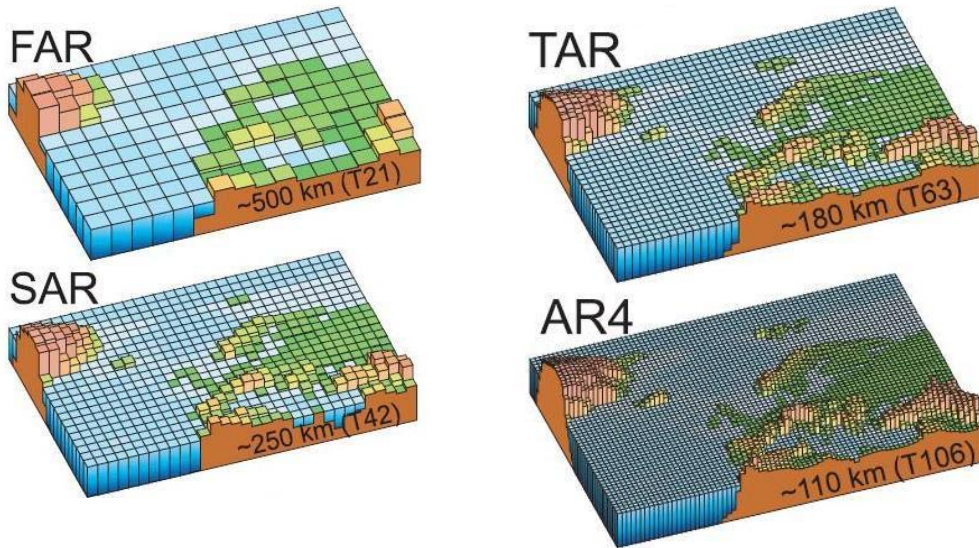
시나리오	SRES						
	A1				A2	B1	B2
시나리오 그룹	A1C	A1G (석탄)	A1B (석유)	A1T	A2	B1	B2
인구성장	낮음	낮음	낮음	낮음	높음	낮음	중간
경제성장	매우 높음	매우 높음	매우 높음	높음	중간	높음	중간
에너지 수요	낮음~중간	낮음~중간	낮음	낮음	높음	낮음	중간
토지사용변화	높음	높음	중간	중간	중/소	높음	중간
에너지자원 사용가능성	높음	높음	중간	중간	낮음	낮음	중간
기술 변화	빠름	빠름	빠름	빠름	느림	중간	중간
기술변화의 방향성	석탄	석유 및 가스	균형	비화석 연료	지역적	효율성 및 탈물질	보통의 Dynamic

출처 : 전성우 외 2004. 기후변화영향평가모델 재인용



<그림 3.2> 시나리오별 지표온도 상승 전망

이러한 기후시나리오는 사용하는 수치 모델에 따라 좌우 되며, 지난 수십 년간 이러한 모델의 연속적인 변천은 1070년대부터 현재까지 30년 동안 대략 100만 배로 증가된 슈퍼컴퓨터의 연산능력 증가로 발전해 오고 있으며, 이러한 연산과정은 모델의 복잡성, 모사기간, 공간분해능의 증가를 가능하게 하였으며, 따라서 미래기후를 전망하는 모델들은 시간의 경과와 함께 발전되어 왔다(그림 3.3).



<그림 3.3> IPCC 평가 보고서; FAR(1990), SAR(1996), Tar(2001), Ar4(2007)에서 사용된 기후모델의 세대별 지리적 해상도 특징(2007 IPCC보고서 기후변화 과학적 근거)

기후모델은 1970년대에는 대기모델로만 구성된 전구순환모델(General Circulation Model, GCM), 1980년대는 지표모델, 1990년대 초는 해양-해빙 모델이 추가 개발되어 급속히 발전한다. 1990년대 중반이후 황순환 및 에어로솔 모델, 탄소모델이 추가되어 인위적 기후변화를 예측하기 위한 적합 모델로서 진보되고 있다.

1990년 Far에서의 대기해양 결합은 매우 초보적인 단계로서, 대부분 Atmospheric-Ocean Mixed layer model을 사용하였으며, 비역학 slab 모델과 대기 모델을 결합한 결과에 의존하였기 때문에 ENSO(엘리뇨-남방진동, El nino-Southern Oscillation) 와 관련된 변동성을 모의 할 수 없었다.

1995년 SAR에서는 결합모델이 급격히 가속되기 시작하였고, BMRC, CCC, COLA, CSIPO, GFDL, GISS, IAP, MPI, MRI, NCAR, UKMO. 총 11개의 결합모델이 사용되어, 기후의 대규모 특징들이 평균적으로 잘 모의 되었으며, 반구, 대륙 등의 큰 공간 규모의 모의가 지역규모 결과보다 정확 하게 모의되기 시작 하였다. 일부 AOGCM(Atmospheric-Ocean General Circulation Model)에서 ENSO를 닮은 변동성

이 CO₂증가에 따라 거의 변화가 없으나 적도상 동태평양에서 해수면 변동성의 감소를 보였고, ENSO와 같은 변동성이 포함된 전 지구 AOGCM은 열대지역 동서평균 하층대류권의 기온에서 연간 변동성이 주로 열대성대륙에 미치는 영향으로 증가 할 수 있다고 제기 하고 있다.

2001년 TAR에서는 미래기후 예측을 위한 모델의 능력에 대한 신뢰도가 증가 하였으며, 이 시기에도 모델은 기후의 모든 양상은 모의 할 수 없고, 특히, 구름, 구름-복사, 구름-에어로솔간의 상호작용에는 불확실성이 있었음, 몇 모델에서는 열과 수증기 플럭스의 비물리적인 보정없이 최근 기후에 대한 모의 결과를 생산하여 만족스러운 결과를 보였고, 이 시기에 이르러 결합모델을 이용한 ENSO 모의 능력이 개선되었지만, 엘리뇨와 관련된 해수면 온도의 최대 변동 지역은 서쪽으로 옮겨져 나타났고 강도는 약하게 나타났다. 이전까지 결합모델에서 모의 하지 못했던 몬순과 북대서양 진동(NAO)을 포함한 다른 현상들이 TAR에서 다루어지기 시작하였고, 총 21개 ARPEGE/OPA2, BMRCa, CCSR/NIES, CCSR/NIES2, CSM1.0, CSM1.3, ECHHAM/OPYC, GFDL_R15_a, GFDL_R15_b, GFDL_R15_c, GISS2, GOALS, HadCM#, IPSL-CM2, MRI1, MRI2, DOE, PCM의 GCM 모델이 사용되었다.

2007년 AR4 WG1 SPM에서는 다양한 모델로부터 가능한 시뮬레이션수가 보강된 관측 자료를 바탕으로 미래 기후변화 추정에 대한 정량적 근거를 제공하였으며, TAR 이후 AOGCM은 다양한 시간 규모대에서 대규모 변동을 더 잘 묘사 할 수 있으며, AR4의 모델들은 북반구와 남반구 연동 모드, PDO(태평양 10년 주기 진동(Pacific Decadal Oscillation, PDO), PNA(Pacific North America)등의 중위도 패턴을 잘 묘사 할 수 있게 되었으며, 적도에서는 엘리뇨의 주기와 공간 패턴 등이 향상 되었으나, Seasonal phase locking, 엘리뇨-라니냐간의 비대칭성 등은 여전히 보완할 문제점으로 남아 있다. AR4에서는 총 23개의 BCC-CM1, BCCR-BCM2.0, CCSM3, CGCM3.1(T47), CGCM3.1(T63), CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, ECHAM5/MPI-OM, ECHO-G, FGOALS-g1.0, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, GISS-AOM, GISS-EH, GISS-ER, INM-CM3.0, IPSL-CM4, MIROC3.2(hires), MIROV3.2(medres), MRI-CGCM2.3.2, PCM, UKMO-HadCM3, UKMO-HadGEM1 GCM 결합모델이 사용되어 미래기후 변동을 예측하였다.

이러한 모델로 산출된 자료들은 공간적으로 전 지구를 시간적으로 장기간이 포함되

기 때문에 공간 해상도가 약 400km으로 매우 넓다. 지구규모의 기후변화는 결과적으로 지역기후의 변화로 나타날 것이므로 이를 지역차원에서 예측하는 지역기후모형(Regional Climate Model, RegCM)이 필요하다. 지역기후모형은 GCM 모의 결과를 직접 분석하거나 통계모형 또는 3차원의 역학모형을 이용하여 산출할 수 있다. IPCC는 여러 개의 GCM으로 모의한 결과를 종합 분석하여 미 대륙중북부, 동남아시아, 아프리카 사하라지역, 남부 유럽, 호주 대륙의 기후변화를 유추하였다.

컴퓨터의 계산능력이 상당히 증가하였지만, 현재도 CGCM의 수평해상도는 매우 낮기 때문에 복잡한 지형을 가진 지역에서 지역적 강제력 효과를 잡아낼 수 없기 때문에 낮은 해상도의 GCM 모의 결과로부터 고해상도 지역기후 정보를 만드는 다운스케일링(Downscaling)방법이 제안되었고, 통계적 방법과 역학적인 지역기후모의 모형이 사용되고 있다.

20세기 후반 들어 기후변화가 환경, 사회, 경제에 미치는 영향을 평가하는데 있어 고해상도 정보를 요구하기에 이르렀다. 하지만 지역기후모델의 고해상도 자료를 생산하는 데에는 빠른 계산 능력을 지닌 컴퓨터가 필요하나 과거의 컴퓨터 능력은 제한적이었다. 그래서 과거에 고해상도 수치모델 자료는 주로 단기간의 일기예보를 목적으로 사용되어왔다. 이와 같은 컴퓨터 계산 능력의 제한 때문에 전지구모델에서 저해상도시나리오 자료를 생산하는 데에도 많은 제약을 받았다. 이에 저해상도결합 GCM안에 고해상도 지역 모델을 내삽(nesting)하는 기법이 개발되고, 최근 컴퓨터 성능이 향상됨에 따라 영국, 미국, 일본, 독일, 캐나다 등을 중심으로 고해상도 지역기후모델을 사용하여 장기간에 걸친 미래 기후변화 시나리오 자료를 생산하기 위한 노력들이 활발하게 진행되고 있다. 결론적으로 최근에는 전지구 기후모델들이 생산한 기후변화 시나리오 자료가 어느 정도 분석됨에 따라 고해상도의 상세한 지역에서의 미래 기후변화 시나리오 자료 생산으로 그 초점이 바뀌어 가고 있다.

이전에 언급되었던 기후모델들은 즉, 지구 순환모델(global circulation model, GCM)들은 대략 크기가 300km의 수평해상력을 가지는 것으로, 격자 크기와 비교하여 규모가 큰 기상과 기후는 상당히 잘 묘사하고 있지만, 지역규모의 격자 크기를 가지는 규모에서는 지구모델의 결과로는 상당한 한계를 가지고 있기 때문에 지역규모에서 실질적으로 나타나는 현상들을 설명하기에는 부족하다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 개발된 것이 지역기후모델(regional climate model)이다. 수평해상도로 보면 대략 25km,

50km에서 지역을 적절하게 다룰 수 있는 모델이 지구모델에서 동지격자화(nested) 될 수 있다. 지구모델은 RCM을 위하여 대규모 강제력에 의한 대기 순환의 방응과 경제 정보의 병화를 제공하며, 강제력과 관련되는 물리적 정보는 지역규모의 격자에 입력되고 상세 순환의 변화는 RCM에 나타난다. RCM은 GCM에 포함된 것 보다 더 작은 규모의 강제력(특히 지형과 피복의 비 동질성에 기인)을 설명할 수 있으며, 더 작은 규모에서 대기 순환과 기후변수들을 모의 할 수 있다(John Houghton, 2004).

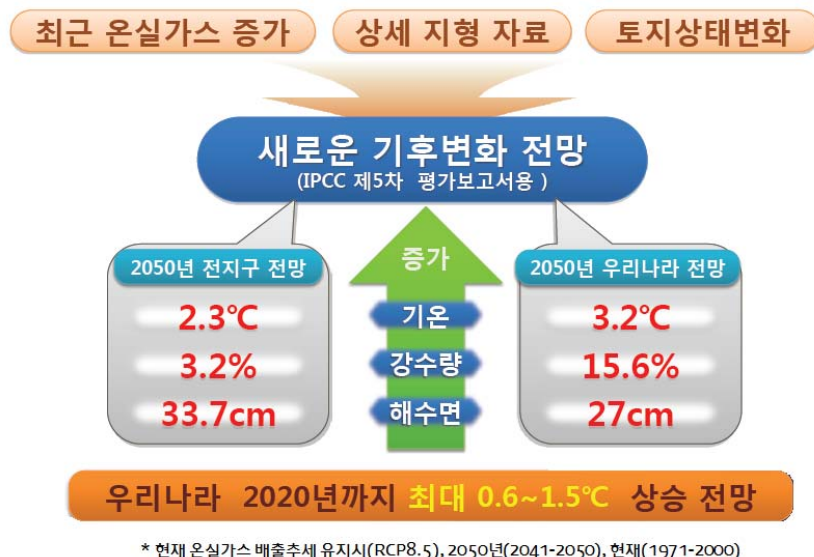
또한, 통계적 규모 축소법(Downscaling)은 전지구 기후모델은 표현 할 수 없는 상세한 예측 값을 산출하기 위해 사용된다. 규모축소방법으로는 통계적 방법과 역학적 방법이 있는데, 통계적 방법은 장기간의 관측 자료를 이용하여 대규모 기후변화와 국기 기후변수간의 관계를 이용하여 산출하여 보정하는 것으로 산출된 관계는 전지구 기후모델의 결과로부터 국지 변수를 계산하는데 사용된다. 역학적 방법은 전지구 기후모델 결과에서 주어지는 시간중속 경계조건을 가지고 지역기후모델을 이용하는 방법이다.

오성남 등(1995)은 지구환경 감시 및 기후변화 예측 기술 보고에서 5개의 GCM에서 모사된 $1 \times \text{CO}_2$ 기후의 남한지역의 강수량을 분석한 결과 GCM이 남한지역과 같은 소규모 지역의 강수량을 모의 하는데는 상당한 어려움과 불확실성이 존재하며, 배증 CO_2 에 기인하는 남한지역의 강수량 변화는 사용된 모델에 따라 크게 다르며 이러한 결과들은 GCM의 낮은 공간 분해능과 강수량을 결정하는 물리적 과정이 모델의 공간 분해능보다 작은 소규모 현상이라는 점에 기인한다고 볼 수 있으며, 의미 있는 그리고 일관성 있는 결과를 얻기 위해서는 GCM이 적어도 중규모(mesoscale)기상 현상을 모의할 수 있도록 모델의 공간 분해능이 높아질 필요가 있다고 하였다.



제2절 신기후변화 시나리오

전 절에서 언급한 바와 같이 IPCC에서는 2013년에 새로운 기후변화 시나리오를 발표할 계획에 있다. 이를 위해 우리나라를 비롯하여 14개국에서 새로운 기후변화 전망을 발표하였거나 계획 중에 있으며, 이를 바탕으로 국가간 비교·검증을 거쳐 IPCC 5차 평가보고서(2013예정)에서 그 결과를 공표할 예정이다. 이에 앞서 우리나라에서는 2011년 RCP(Representative Concentration Pathway) 시나리오에 기반한 국가 표준 기후변화 시나리오를 발표했다. 이에 따르면 시나리오에 따라 우리나라 기온은 2020년까지 1.1℃~1.5℃ 상승이 전망되고, 최악의 경우 지난 100년간 일어난 기후변화 1.8℃ 상승이 2020년 내에 발생할 가능성이 있으며, 이러한 결과는 IPCC 5차 보고서에 2013년에 반영할 것이라고 발표하였다.



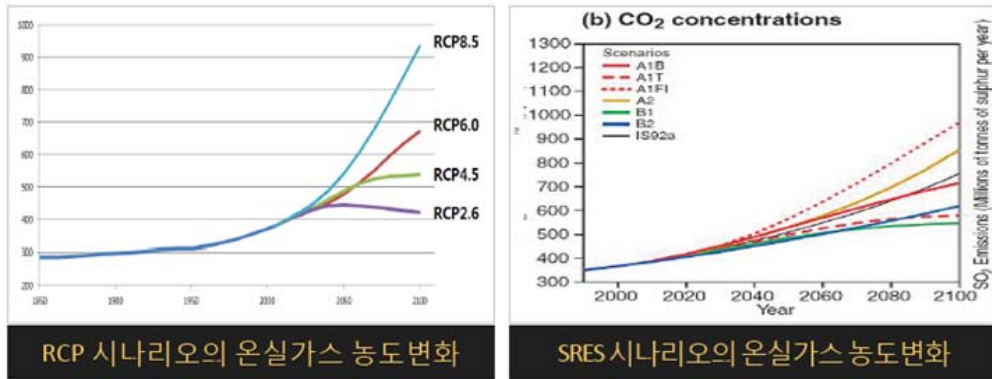
<그림 3.4> 신시나리오에 따른 전망

기후변화 시나리오는 온실가스, 에어로졸, 토지이용 상태 등의 변화와 같이 인간활동에 따른 인위적인 원인에 의한 기후변화가 언제, 어디서, 어떻게 일어날 지를 예측하기 위해 기후변화예측모델(지구시스템 모델)을 이용하여 계산한 미래기후(기온, 강수, 습도, 바람 등)에 대한 예측정보를 말하는데 기존의 SRES시나리오에서는 사회·경제유형별 온실가스 배출량을 설정 후 기후변화 시나리오를 산출한데 반해, 새로운 RCP시나리오는 온실가스 농도값을 설정 후, 기후변화 시나리오를 산출하여 그 결과의 대책으로 사회·경제 분야별 온실가스를 배출 저감하는 정책 결정에 활용하게 된다(<http://www.climate.go.kr>, 2012).

〈표 3.3〉 기존 기후변화 시나리오 비교

내용		IPCC4차(2007)	IPCC5차(2013)
인위적 기후변화 요인	온실가스	O	O
	에어로졸	O	O
	지표이용	X	O
모델 분해능	전지구	400km	135km(약9배)
	한반도	27km	12.5km(약4배)
	남한	10km	1km(약100배)
온실가스 시나리오	시나리오명	SRES A1B	RCP8.5
	2100년 CO ₂ 농도	720ppm	940ppm

새로운 온실가스 시나리오는 CO₂ 기준(ppm)에 따라 RCP(대표경로)로 표시되며 RCP2.6은 420ppm, RCP4.5은 540ppm, RCP6.0은 670ppm, RCP8.5은 940ppm을 각각 의미한다. RCP2.6은 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우로 실현 불가능한 가정이며, RCP4.5는 온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 경우, RCP6.0은 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우, RCP8.5는 최악의 경우로 현재 추세(저감없이)로 온실가스가 배출되는 경우로 BAU 시나리오를 사정하고 있다.



시나리오 종류 PPM 농도	새로운 시나리오(RCP)				기존 시나리오(SRES)		
	2.6	4.5	6.0	8.5	B1	A1B	A2
CO2 기준(ppm)	421	538	670	936	550	720	830

<그림 3.5> RCP 시나리오별 이산화 탄소 배출량 추이

새로운 기후변화 시나리오 산출과정은 <그림 3.6>과 같으며, 기상청에서는 2012년 10월 현재 전지구 RCP 4종에 대한 기본 시나리오 생산이 완료되었고, 한반도 및 남한상세 시나리오 RCP 4종은 2012년말 생산완료 예정이다. 또한 2013년 이후에는 한반도 및 남한상세 앙상블 시나리오를 생산하여 미래 전망에 대한 불확실성 정보를 제공할 예정이다(기상청, 2012)



<그림 3.6> 기후변화 시나리오 산출과정

현재 공개된 국가표준 기후변화 시나리오에 따르면 한반도의 평균기온은 2100년 최대 6.0℃ 상승하고 강수량은 20.4% 증가하는 것으로 예측되었다(기상청, 2012).

<표 3.4> 전지구 및 한반도 기후변화 전망(RCP시나리오)

		RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
기온 (℃)	전지구	1.4	2.4	2.9	4.7
	한반도	-	3.4	-	6.0
강수량 (증가 %)	전지구	3.0	4.6	5.0	7.2
	한반도	-	17.3	-	20.4

- 1971-2000년 대비 21세기말(2070-2099)
- 전지구 : 8개 기후변화 시나리오 평균, 한반도 : 기상청 기후변화 시나리오 결과

현재 기상청 기후변화정보센터(<http://www.climate.go.kr/>)에서는 기후변화 시나리오를 제공하고 있다. 현재 제공 중인 RCP 기후변화 시나리오 현황은 <표 3.5>와 같으며, 활용목적을 명시하여 신청하면 활용이 가능하다.

〈표 3.5〉 기후변화정보센터 제공 RCP시나리오 현황

	전지구	한반도	남한상세	기후극한지수	응용기후정보
공간범위	지구전체	경도: 110-144.625 위도: 26.5-48.875	남한지역	남한지역	73개 지점 230개 행정구역
시간범위	1860-2100	1950-2100	2000-2100	2000-2100	한반도(1950-2100) 남한상세(2000-2100)
공간해상도	약 135km	약 12.5km	약 1km	약 1km	12.5km, 1km
시간해상도	월	일,월	일월	월,년	일,월
정보종류	기온(최고, 최저, 평균), 강수, 상대습도 등	기온(최고, 최저, 평균), 강수, 상대습도 등	기온(최고, 최저, 평균), 강수	기온지수(6종 내외)	기온(최고, 최저, 평균), 강수, 상대습도, 현지·해면기압, 평균·최대풍속

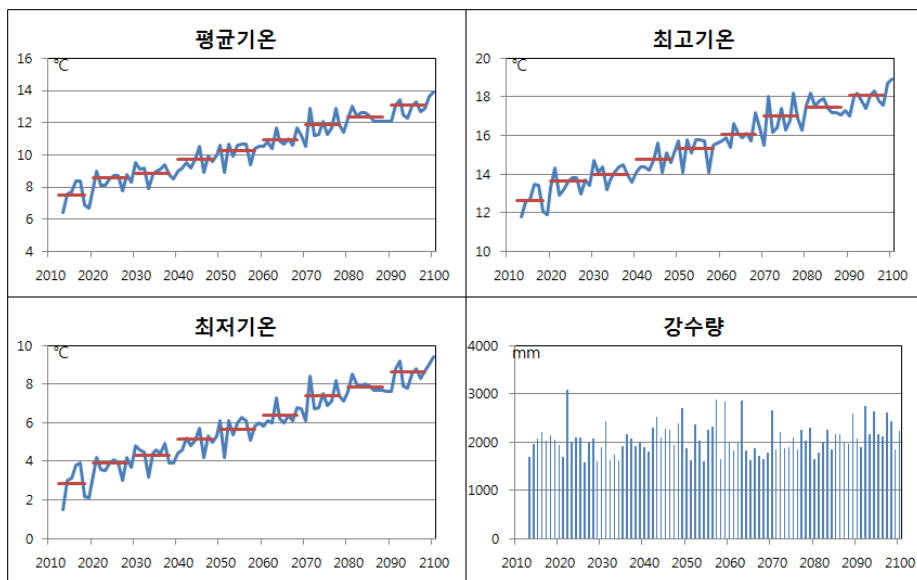


제3절 개최지 주변 기후변화 시나리오 전망

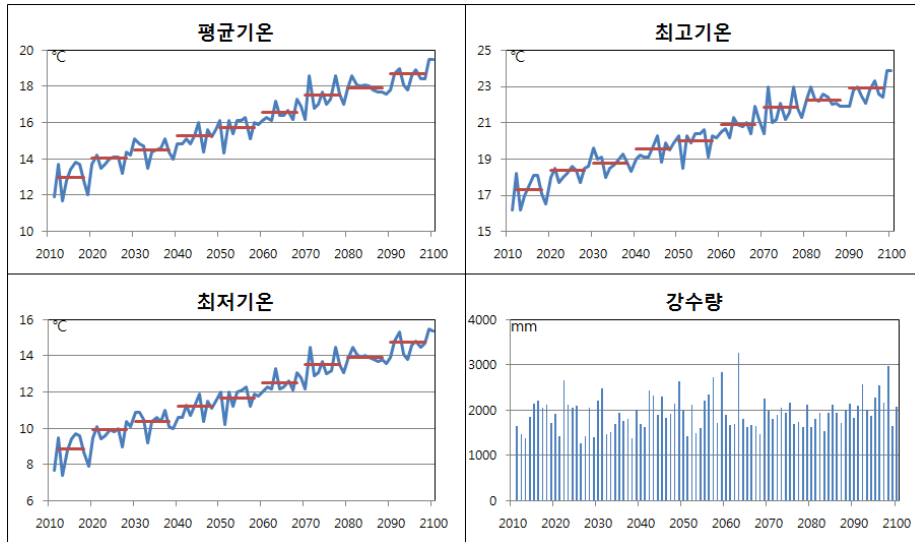
1. 국가기후변화 시나리오에 따른 전망

국가표준 기후변화시나리오에 따라 2018평창동계올림픽 개최지 주변의 기후변화 전망을 실시하였다. 이를 통해 기후변화 향후 올림픽 기간의 올림픽 개최지 주변 기후에 대한 추정과 이에 대한 대책을 강구할 수 있는 기초자료 제공할 수 있을 것이다.

<그림 3.7>과 <그림 3.8>은 대관령과 강릉의 각각 지점에서의 기온과 강수량을 나타낸 그래프이다. 평균기온과 최고, 최저 기온을 보면 기온이 상승하는 것을 한눈에 볼 수 있다.



<그림 3.7> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 기온과 강수량



<그림 3.8> 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 기온과 강수량

<표 3.6>는 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량을 나타낸 표이다. 기온을 보면 2010년대에 약 7.5°C이고, 2090년대에는 약 13°C로 5.5°C가량 상승한 것을 알 수 있다. 강수량의 경우에는 2010년대에 비해 2090년에 약 280mm증가한 2,283mm로 나타났다. 2010년대를 현재라고 생각했을 때 장래에는 기온과 강수량 모두 높은 값을 나타냈다.

<표 3.6> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량

항목	2010 년대	2020 년대	2030 년대	2040 년대	2050 년대	2060 년대	2070 년대	2080 년대	2090 년대
평균기온(°C)	7.51	8.55	8.88	9.71	10.23	10.95	11.90	12.35	13.07
최고기온(°C)	12.66	13.64	14.01	14.79	15.32	16.08	17.01	17.46	18.08
최저기온(°C)	2.86	3.89	4.28	5.13	5.68	6.37	7.37	7.86	8.64
강수량(mm)	2008.5	2005.4	1934.9	2211.7	2151.7	1979.0	1996.0	2079.7	2283.1

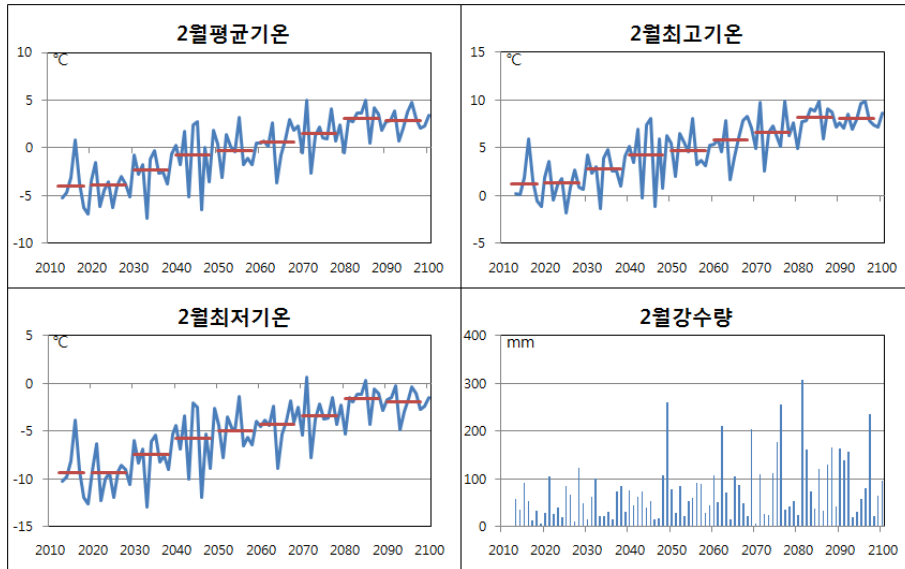
<표 3.7>은 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량을 나타낸 표이다. 대관령 지점과 마찬가지로 기온과 강수량 모두 현재에 비해 높은 값을 나타냈

다. 평균기온은 2090년대에 약 18.7℃로 2010년대에 비해 약 5.7℃ 상승했다. 강수량은 약 300mm 증가한 2,221mm로 나타났다.

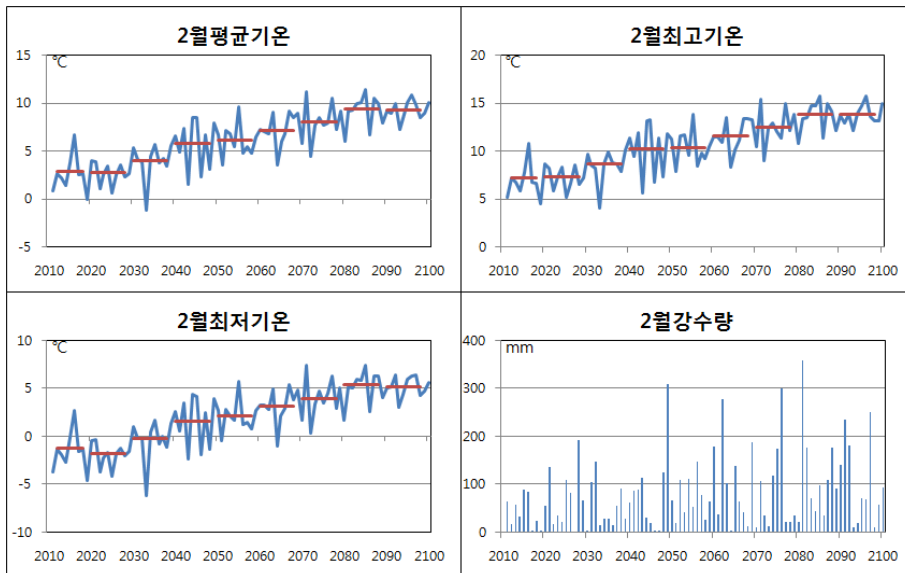
〈표 3.7〉 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량

항목	2010 년대	2020 년대	2030 년대	2040 년대	2050 년대	2060 년대	2070 년대	2080 년대	2090 년대
평균기온(℃)	12.99	14.05	14.48	15.29	15.74	16.57	17.55	17.94	18.69
최고기온(℃)	17.33	18.38	18.77	19.57	20.02	20.88	21.85	22.23	22.93
최저기온(℃)	8.88	9.92	10.37	11.22	11.67	12.51	13.53	13.92	14.75
강수량(mm)	1928.9	1869.1	1775.5	2110.7	2033.8	1908.0	1868.5	1902.3	2221.9

〈그림 3.9〉와 〈그림 3.10〉은 대관령과 강릉의 각각 지점에서의 2월 기온과 강수량을 나타낸 그래프이다. 두 지점 모두 2010년대와 2020년대 그리고 2080년대와 2090년대의 변화가 거의 나타나지 않았다. 하지만 앞의 결과와 마찬가지로 평균기온과 최고, 최저기온은 점차적으로 상승하는 것을 알 수 있다. 강수량을 보면 100mm 이상을 나타내는 해의 빈도수가 증가하는 것을 알 수 있다.



<그림 3.9> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 2월 기온과 강수량



<그림 3.10> 강릉 지점의 RCP시나리오에 의한 2월 기온과 강수량

<표 3.8>은 2월에 대해서 대관령 지점에서의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량을 나타낸 표이다. 기온의 경우 2080년대와 2090년대에서 약간 떨어지는 경향이 나타났지만 2010년대에 비해서는 약 6.9℃가 상승한 2.9℃가 나타났다. 강수량의 경우도 약 50mm 증가한 89.9mm로 나타났다.

<표 3.8> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 2월의 10년 평균 기온과 강수량

항목	2010 년대	2020 년대	2030 년대	2040 년대	2050 년대	2060 년대	2070 년대	2080 년대	2090 년대
평균기온(℃)	-4.05	-3.85	-2.28	-0.78	-0.23	0.66	1.47	3.08	2.91
최고기온(℃)	1.24	1.37	2.81	4.31	4.76	5.82	6.61	8.20	8.10
최저기온(℃)	-9.36	-9.34	-7.42	-5.80	-4.96	-4.27	-3.38	-1.61	-1.94
강수량(mm)	40.0	53.6	51.4	75.2	60.7	81.7	85.9	123.0	89.9

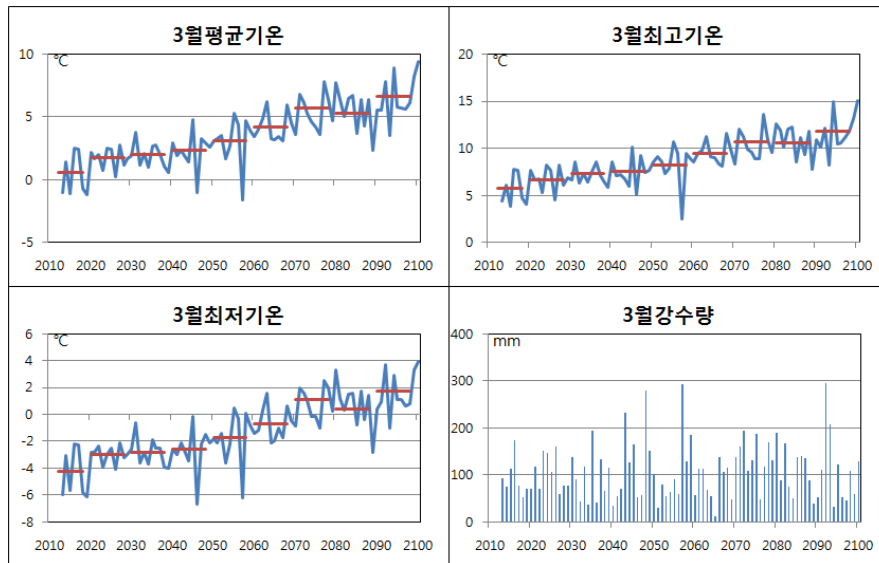
<표 3.9>는 2월에 대해서 강릉 지점에서의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량을 나타낸 표이다. 대관령과 마찬가지로 2080년대와 2090년대 사이를 제외한 모든 연도에서 꾸준히 상승하였고, 2040년대부터 최저기온이 영상으로 나타났다. 강수량의 경우도 약 56mm 증가한 98mm로 나타났다.

<표 3.9> 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 2월의 10년 평균 기온과 강수량

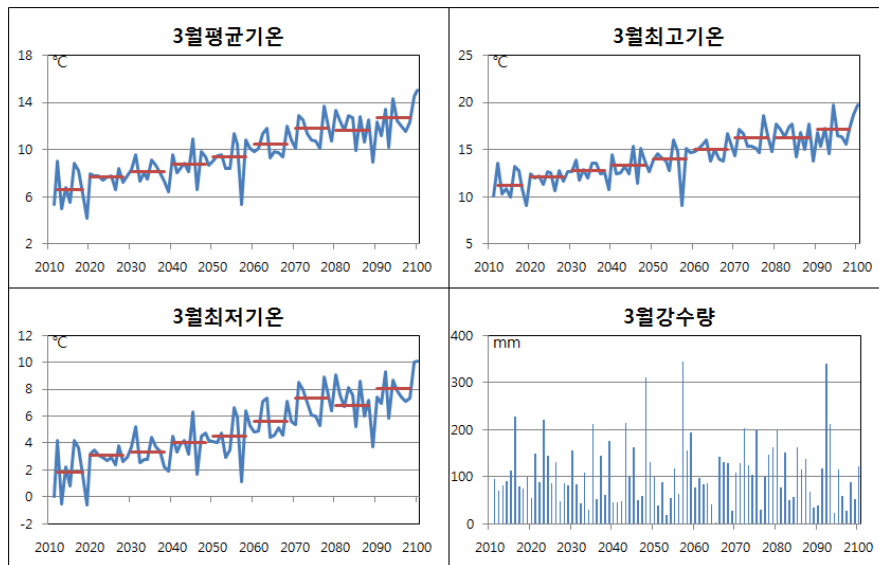
항목	2010 년대	2020 년대	2030 년대	2040 년대	2050 년대	2060 년대	2070 년대	2080 년대	2090 년대
평균기온(℃)	2.89	2.78	4.05	5.75	6.14	7.15	8.04	9.43	9.33
최고기온(℃)	7.21	7.35	8.63	10.19	10.40	11.60	12.47	13.83	13.80
최저기온(℃)	-1.28	-1.82	-0.30	1.56	2.10	3.06	3.94	5.32	5.18
강수량(mm)	42.4	73.1	56.5	83.8	81.8	86.3	83.1	129.1	98.3

<그림 3.11>와 <그림 3.12>는 대관령과 강릉의 각각 지점에서의 3월 기온과 강수량을 나타낸 그래프이다. 2월과는 반대로 2010년대와 2020년대의 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 그리고 2080년대는 2070년대보다 기온이 낮음을 알 수 있다. 하지만 앞의 결과와 마찬가지로 시간에 따른 기온 상승은 뚜렷하게 나타났다. 강수량에서는 뚜렷한 패

턴을 찾아볼 수 없었다.



<그림 3.11> 대관령지점의 RCP 시나리오에 의한 3월 기온과 강수량



<그림 3.12> 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 3월 기온과 강수량

<표 3.10>은 3월에 대해서 대관령 지점에서의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량을 나타낸 표이다. 2070년대와 2080년대 사이에 기온이 약간 떨어지는 것을 제외하고는 꾸준히 상승하였으며 2090년대에는 약 6℃ 상승한 6.6℃를 나타냈다. 2070년대부터 최저기온이 영상으로 나타났다. 강수량의 경우는 2월과 비교해서 증가한 양이 적었지만, 약 25mm 증가한 115mm를 나타냈다.

<표 3.10> 대관령 지점의 RCP 시나리오에 의한 3월의 10년 평균 기온과 강수량

항목	2010 년대	2020 년대	2030 년대	2040 년대	2050 년대	2060 년대	2070 년대	2080 년대	2090 년대
평균기온(℃)	0.56	1.71	2.02	2.32	3.13	4.22	5.72	5.32	6.65
최고기온(℃)	5.78	6.69	7.26	7.52	8.25	9.47	10.72	10.57	11.78
최저기온(℃)	-4.25	-2.96	-2.81	-2.58	-1.74	-0.69	1.12	0.41	1.73
강수량(mm)	89.8	109.9	86.7	128.2	103.6	90.3	143.0	96.8	115.7

<표 3.11>은 3월에 대해서 강릉 지점에서의 RCP 시나리오에 의한 10년 평균 기온과 강수량을 나타낸 표이다. 대관령과 마찬가지로 2070년대와 2080년대 사이에 약간의 기온이 감소하였고, 이를 제외하고는 계속해서 상승하였다. 강수량의 경우는 약 13mm 증가한 115mm로 나타났다.

<표 3.11> 강릉 지점의 RCP 시나리오에 의한 3월의 10년 평균 기온과 강수량

항목	2010 년대	2020 년대	2030 년대	2040 년대	2050 년대	2060 년대	2070 년대	2080 년대	2090 년대
평균기온(℃)	6.58	7.68	8.15	8.77	9.38	10.44	11.84	11.66	12.68
최고기온(℃)	11.16	12.10	12.77	13.27	13.98	14.99	16.19	16.29	17.10
최저기온(℃)	1.81	3.05	3.34	4.01	4.52	5.61	7.32	6.81	8.05
강수량(mm)	102.2	118.8	95.2	122.0	114.8	84.4	139.2	88.9	115.5

2. SRES 시나리오 활용

현재는 IPCC 5차 보고서 발간 전으로 국제적으로는 4차 보고서의 결과물을 표준으로 통용되고 있다. 따라서 본 연구과제 계획 단계에서는 SRES기후변화 시나리오를 활용하기 위한 방법론을 조사하고 활용을 위한 준비를 하였으나, 국내에서는 국가 표준 시나리오로 RCP 시나리오와 통용되고 있고, 국제적으로도 RCP CO₂ 농도를 표준으로 결정하였으나 다만 농도경로에 따른 기후모델링 결과에 대한 표준이 정해지지 않은 상태이므로 본 연구에서는 기상청에서 발표한 RCP 시나리오 결과를 활용하였다.

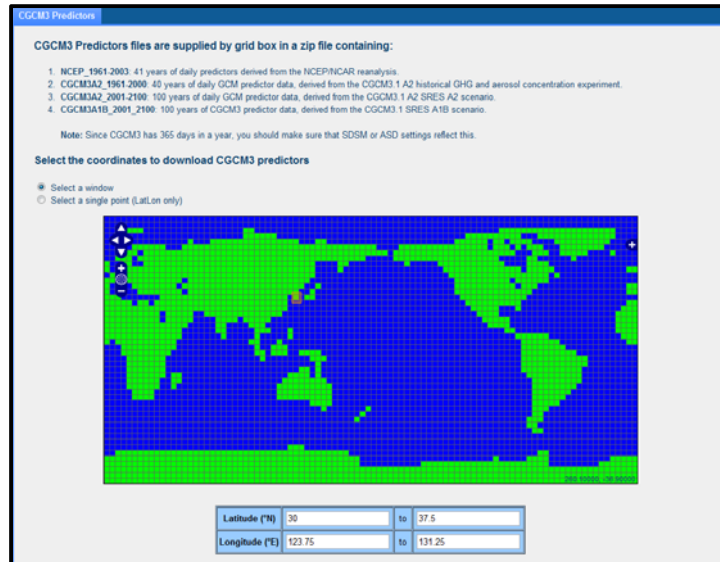
본 절에서는 연구과정에서 조사된 SRES시나리오 활용을 위한 방법론에 대해 소개하였다.

SRES기후변화 시나리오 결과를 활용하기 위해서는 먼저 SRES 시나리오의 격자가 110km 이상으로 본 연구와 같이 좁은 면적을 대상으로는 기후시나리오가 생성되어 있지 않다. 특히나 평창군과 강릉시에 대한 기온과 강수량 예측은 제공되는 GCM자료를 활용하여 상세화 후 활용하는 방법을 사용해야 한다. GCM 자료는 전지구적인 기후예측 모델로써 광역규모의 기후예측에는 좋은 모델이나 각 지역별 즉, 지역규모의 기후예측 모델로써는 넓은 격자로 인하여 자세하게 모사할 수 없는 단점이 존재하고 있다. 이에 지역별 기후예측을 위해서는 축소법이 사용되게 된다. 축소법의 종류로는 통계적 축소법(Statistical Downscaling)과 동적 축소법 (Dynamical Downscaling)으로 나눌 수 있으며, 두 방법은 <표 3.12>와 같이 각각의 장·단점이 존재하고 있으므로, 각각의 방법에 적합한 축소법을 적용하여 사용하는 것이 좋다. 본 연구에서는 지역규모의 관측자료와 광역규모의 GCM 자료들 간에 통계적 관계를 도출하고 이를 통해 지역규모의 고해상도 자료를 얻을 수 있는 통계적 축소법을 사용하였다.

〈표 3.12〉 통계적 축소법과 동적 축소법의 장단점

	통계적 축소법	동적 축소법
장점	<ul style="list-style-type: none"> - GCM에서 지점 단위의 기후정보 습득 가능 - 다양한 지역을 대상으로 사용가능 - 관측지 자료 직접사용 가능 - 통계학적 이론에 근거 - 계산이 빠르고 비용이 저렴함 	<ul style="list-style-type: none"> - GCM 결과값으로 인하여 10~50km정도의 고해상도 자료추출 가능 - 물리적 진행과정이 고려됨
단점	<ul style="list-style-type: none"> - GCM 경계조건의 현실성에 의존 - 장기간의 관측자료 필요 - 사용변수에 따라 결과치 달라짐 - 지역과 계절의 영향이 이론에 직접 영향을 미침 	<ul style="list-style-type: none"> - GCM 경계조건의 현실성에 의존 - 계산이 느리며 많은 비용 필요 - 사용가능 시나리오의 숫자가 적음 - GCM결과의 영향력이 큼

본 연구와 같은 규모의 분석에서는 전지구모형(GCM)을 활용하는데 쉽게 접근 가능한 캐나다 CCCMA(Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis)에서 제공한 CGCM3.1 T47 모델을 사용하는 것이 좋다. 모델에 대한 입력자료와 상세화를 위한 프로그램은 DAI Portal(<http://loki.qc.ec.gc.ca/DAI>)에서 제공하고 있으며 CGCM3.1 자료의 기간은 2001~2100년 이며, 격자의 간격은 가로, 세로 각각 3.75°로 큰 격자 간격을 보인다.

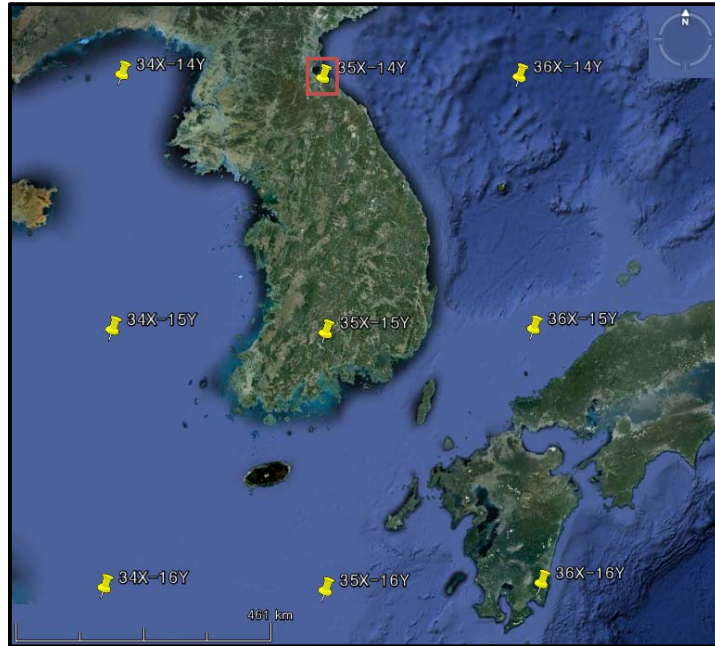


<그림 3.13> DAI Portal에서 제공하는 GCM 격자

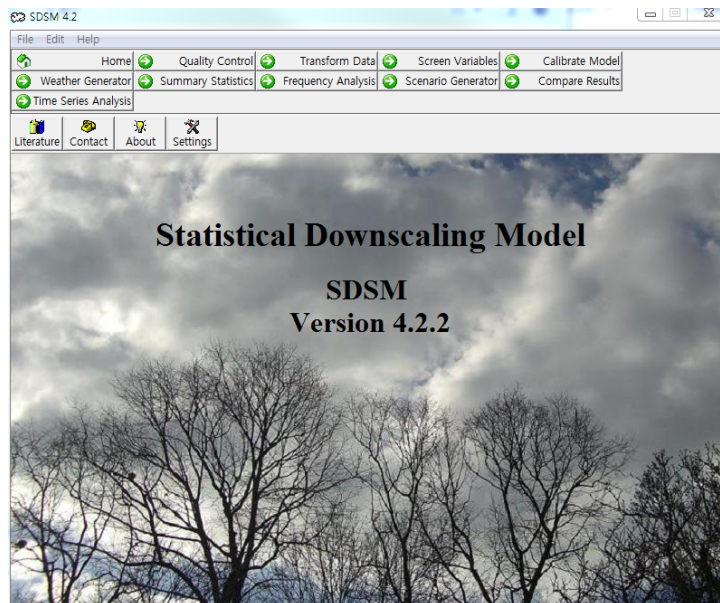
GCM 자료를 활용하기 위해서는 한반도 인근 지점의 자료를 활용해야 하며 한반도 인근의 9개(그림 3.14)의 GCM 격자점 중 강원도와 가장 가까운 35X-14Y 지점(그림 3.14)의 자료들을 증선형 회귀분석을 통하여 선형회기식을 생성하여 지역 기후자료를 생성할 수 있다.

만약 기온자료에 대한 시나리오를 생성하고 할 때에는 지역 기후자료를 DAI Portal에서 제공하는 SDSM(Statistical Downscaling Model, 그림 3.15)을 사용하여 지역의 미래 기온자료를 생성할 수 있다.

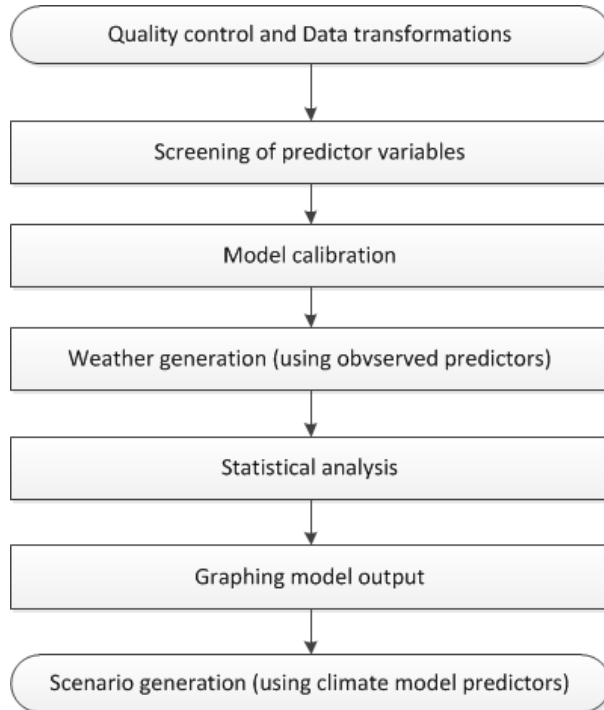
SDSM에서는 <그림 4.16>과 같이 7단계를 거쳐 통계적으로 상세화된 기후 시나리오를 생성해 준다.



<그림 3.14> 한반도 주변 GCM 지점



<그림 3.15> SDSM 초기화면



<그림 3.16> SDSM 상세화 과정(Wilby 등, 2007)

전지구 모형(GCM)은 모델의 격자 간격, 모수화의 불완전으로 인하여 지역 규모의 상세한 기후 분포보다는 광역규모의 대기변동을 예측하는데 유리하다. 또한 위에서 명시한바와 같이 CGCM의 위도·경도는 각각 3.75°로 지역 규모의 즉, 우리나라의 세부 지역까지 완전하게 기상현상을 표현 할 수 없으므로 고해상도의 자료를 얻기 위해서 통계적 축소법이 사용된다.

통계적 축소법을 이용하여 고해상도의 지역규모 기상데이터를 잘 모사하기 위해서는 광역규모의 독립변수(Predictor)와 지역규모의 종속변수(Predictand)간의 상호 밀접한 연관성이 필요하다. 여기서 Predictor는 통계적 축소법에 의한 회기분석 모형을 만들기 위해 입력되는 데이터로서 GCM 등 광역규모의 데이터를 말한다. Predictand는 출력 데이터로써 실제측정이 가능한 온도, 강수 등의 지역 규모의 변수들이 사용된다 (Benestad 등, 2008).

$$\vec{y} = f(\vec{x}) \quad (3.1)$$

식(3.1)은 Predictor와 Predictand의 관계를 나타내는 식으로 \vec{x} 는 Predictor를 나타내고 \vec{y} 는 Predictand를 의미한다(Benestad 등, 2008).

회귀분석이란 여러 개의 변수들간의 관계를 함수식으로 모형화 하기위한 분석방법으로써 종속변수를 1개 이상의 독립변수들의 선형함수모형으로 표현한다. 독립변수가 2개 이상인 경우 선형회귀모형을 중선형 회귀모형 (MRL, Multiple Linear Regression Model)이라 한다(염준근, 2005). 독립변수가 2개라면 중선형 회귀분석식을 사용하며 식(3.2)와 같다.

$$y_j = \beta_0 + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \epsilon_j \quad (3.2)$$

식(3.2)에서 y_i 는 예측된 변수이고, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 는 모집단의 회귀계수로서의 모수이며, x_{1j} 과 x_{2j} 는 i 번째 주어진 독립변수 x_1, x_2 의 고정된 값이다. 또 ϵ_i 는 i 번째 측정된 y_i 의 오차항 이다. 중선형 회귀분석법의 목적은 다수의 독립변수의 변화에 따른 종속변수의 변화를 예측하는데 그 목적을 두고 있다. 또한 기록된 기후 파라미터들을 사용하여 Predictor를 시뮬레이션 할 수 있는 확률모델인 Weather Generation 기법을 사용할 수 있다.

제 4 장

동계올림픽 환경계획

제 1 절 과거 올림픽 사례

제 2 절 평창동계올림픽 환경계획

제4장

동계올림픽 환경계획



제1절 과거 올림픽 사례

동계올림픽 개최에 있어 기후변화에 대한 본격적인 대응은 2002년 솔트레이크동계올림픽에서부터 시작되었다고 할 수 있다. 본 연구에서는 한국기후변화대응연구센터(2012) 자료를 기초로하여 2002 솔트레이크동계올림픽, 2006 토리노동계올림픽, 2010 밴쿠버동계올림픽을 대상으로 환경올림픽 계획을 조사하고 기후변화 대응 사례를 분석하였다.

영역을 하계올림픽까지 확장하게 되면 1992년 프랑스 알베르빌가 환경파괴로 인한 최악의 올림픽이었다는 평가를 받으면서 환경에 대한 IOC요구가 시작되었다. 이후 환경은 스포츠, 문화와 함께 올림픽의 3대 정신이 되었고, 올림픽 성공 여부를 판단하는 중요한 키워드가 되었으며, 특히 2018평창동계올림픽 또한 국제사회에 환경올림픽 개최를 위한 우리의 노력을 약속함으로써 개최가 확정 되었다. 따라서 환경올림픽 계획에 따른 대회 개최는 필수 불가결한 요소이며 환경올림픽 개최계획은 기후변화대응으로부터 시작되어야 할 것이다.

지구온난화에 의한 기후변화현상이 가시적으로 드러나게 되고 과거에 비해서 적설량이 적어짐에 따라 기후변화가 특히 동계올림픽 설상종목 경기 운영에 위협요소가 되고 있으며, 특히 2010밴쿠버동계올림픽에서 막대한 제설(snow-making)경비가 소요되었다. 동계올림픽 대회에서 기후변화대응에 대한 최초의 언급은 2002 솔트레이크동계올

림픽에서 시작되었으며 솔트레이크동계올림픽 조직위원회(SLOC)에서는 기후변화 이니셔티브(climate change initiative)를 제시하였고 포괄적인 조치를 취하여, 동계올림픽 역사상 최초로 '제로넷 배출(zero net emissions)'의 목표를 세웠다.

<그림 4.1>은 3개의 동계올림픽의 기후변화 대응 목표와 목표를 이루기 위한 주요 전략 등에 대해 정리하였다(한국기후변화대응연구센터, 2012).

항목	2002 솔트레이크	2006 토리노	2010 밴쿠버
목표(Goal)	Zero net emission(제로 넷 배출)	Climate Neutral(기후중립)	Carbon Neutral(탄소중립)
전략 (strategies)	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 기업의 스폰서쉽과 이해당사자 그리고 일반 관중의 연합된 지원 ▶ 탄소상쇄를 위한 프로그램 운영으로 기업의 기부 독려 ▶ 동계올림픽 사상 최초로 탄소배출 관련 목표 제시 ▶ 경기장 건축에서 시범경기, 상화방송, 게임운영, 장애인올림픽운영, 임시발전소까지의 탄소배출을 예측함 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 지자체 (Regionne Piemonte)의 신재생에너지 프로젝트 지원(500만 파운드) ▶ UNEP (United Nations Environment Programme)와 함께 Kenya 전지역 나무식재 ▶ Pinerio의 에너지효율 및 탄소격리 프로젝트 수행 ▶ 개인 기부금으로 해외 탄소중립사업 VER구매 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 온실가스 배출의 측정 및 관리 철저(에너지사용 실시간 모니터링 실시) ▶ 혁신적 디자인과 신재생에너지를 활용한 올림픽선수촌 건설 ▶ 대중참여를 통한 탄소상쇄프로그램 개발 ▶ 건축경기장 건축 최소화 및 명확한 사후사용 계획 수립 ▶ 경기운영에 필요한 에너지를 신재생에너지로 충당

<그림 4.1> 동계올림픽 개최지의 기후변화대응 목표 및 전략

1.1 2002 솔트레이크 올림픽

2002 솔트레이크동계올림픽 조직위원회(SLOC)은 NGO 그룹과 스폰서 회사들과 밀접하게 연합하여 대중 교육과 참여를 독려하는 프로그램을 운영하였다. 동계올림픽 역사상 최초로 혁신적인 기후변화대응 프로그램을 도입하였고 ‘제로 넷 배출(zero net emissions)’의 목표를 제시하였고 이 목표를 이루기 위해 이해당사자와 참여기업들의 스폰서십과 기부금을 모금하였으며, 2002 솔트레이크동계올림픽 조직위원회(SLOC)는 가능한 한 가장 빠른 계획단계에서부터 온실가스관리(Greenhouse gases management) 프로그램을 시행하려고 시도했으며 온실가스 배출을 크게 증가시키는 마지막 순간의 수송수단 변경을 미연에 방지하고자 노력을 기울였다.

2002 솔트레이크동계올림픽은 또한 기존 시설의 활용과 적절한 사후활용 방안 등이 유기적으로 계획된 올림픽으로 사후 올림픽 시설의 높은 활용도를 자랑하고 있다.



2002년 당시 스피트스케이트장



현재 퍼블릭스케이팅장 및 레크레이션 센터로 사용

<그림 4.2> 2002 솔트레이크동계올림픽 시설(유타올림픽오벌)

2002 솔트레이크동계올림픽 조직위(SLOC)는 환경올림픽을 위해 ‘나무심기 운동’을 전개, 올림픽 개최 전까지 유타주에 10만 그루의 나무를, 그리고 전 세계에 1,500만 그루의 나무를 식재했으며, 2002 솔트레이크동계올림픽은 유치 이후 유타올림픽오벌과 유타올림픽파크, 솔저할로우 경기장만 새롭게 건설되었는데, 최소한의 연료로 운영될 수 있도록 연료 효율적이면서 친환경적으로 설계하였다.

스피드스케이팅 경기가 치러진 유타올림픽오벌은 천장 높이를 6m 낮춤으로써 냉난방에 필요한 공간의 부피를 줄였을 뿐만 아니라, 흰색의 천장막을 씌워 햇빛을 반사, 내부 온도가 시원하게 유지될 수 있도록 설계하였으며 미국 친환경건축물 인증(LEED)을 받았으며, 스키점프와 봅슬레이 등의 경기가 치러진 유타올림픽파크는 산맥의 지형을 훼손하지 않도록 건설되었으며, 빗물이 유출되지 않도록 관리함으로써 토양침식을 막고 지표수의 수질을 향상시켰다. 크로스컨트리스키와 바이애슬론 등의 경기가 치러진 솔저할로우는 생태계를 파괴하지 않도록 설계되었으며, 하천을 복구하고 야생동물 및 철새들을 위한 습지개발을 하는 등 친환경적으로 설계되었다.

2002 솔트레이크시티 동계올림픽을 위해 건설된 경기장들은 일회성이 아닌, 지역의 유산으로 남겨지길 바라는 시민들의 바람에 따라 설계 단계부터 사후활용을 고려해 지어져, 유타올림픽파크는 스키점프대 아래에 수영장을 설치하고 쥘트랙 등 각종 여름레포츠 시설을 설치했으며, 일반인도 봅슬레이와 스켈레톤을 즐길 수 있도록 시설을 함으로써 일반 대중이 동계스포츠에 가까이 다가갈 수 있는 기회를 제공했다. 유타올림픽오벌은 다목적 레크레이션 센터로써 일반인을 대상으로 각종 스케이팅 강습과 실내 축구 등의 시설로 활용되고 있으며, 솔저할로우는 각종 동계스포츠 뿐만 아니라, 산악 자전거와 골프장 등으로 사용되고 있다.

1.2 2006 토리노 올림픽

HECTOR 프로젝트 (The HEritage Climate TORino)는 메가 이벤트인 2006 토리노 올림픽이 기후변화대응 이슈를 모든 사람들에게 알릴 수 있는 가장 좋은 플랫폼(platform)이라는 것에 착안하여 기후변화 문제에 대한 인식도를 높이고자 했다. 또한 HECTOR 프로젝트 (The HEritage Climate TORino)를 통해 2006 토리노올림픽운영에서 발생한 온실가스를 재조림(reforestation), 에너지 효율제고(energy efficiency) 또는 신재생에너지 생산 프로젝트를 위한 재정투자를 통해 상쇄하고자 했다.

2006 토리노동계올림픽은 환경 친화적인 올림픽으로서 환경보호단체로부터 높은 평가를 받았으며 UNEP(United Nations Environment Programme)와 함께 대회기간 중 2006년 2월 15일밤 GREEN DINNER프로젝트로 교토의정서 발효 1주년 축하행사 개최 등 다양한 기후변화대응 이벤트를 개최하였다.

기후변화대응 측면에서 2006 토리노동계올림픽을 'Carbon Neutral(탄소중립)'이라는

목표를 세운 “HECTOR 프로젝트 (The HERitage Climate TORino)”를 통해 국내외 에너지 효율화 사업, 재생 가능 에너지 사업, 삼림사업 등을 지원함으로써 올림픽을 개최하여 배출되는 이산화탄소의 양을 10만 톤 감축할 계획을 수립하였으며, 2003년과 2005년 2회에 걸쳐 환경보고서를 발행하고, ISO14001 및 EU의 환경관리 및 감사제도(EMAS)에 적합한 환경관리 시스템을 구축하였다. 여기에는 16개의 환경지표(물 순환, 대기질, 에너지 소비량, 쓰레기 발생량, 생태계, 경관 등)를 포함한 올림픽 회장의 모니터링 계획을 책정했으며 대회장 주변의 호텔과 관광시설에 대해서는 에코라벨의 취득을 장려하고 취득을 위한 지원을 실시다.

UNEP와 그린피스가 후원 파트너십을 이루어 ‘Refrigerants, Naturally !’라는 캠페인을 전개하여 올림픽 공식 스포서 코카콜라, 맥도날드, 유니레버 등이 참여, CO₂를 활용하여 판매 즉시 순간적인 냉장기술 활용, CFCs 및 HFCs의 수요를 저감시켰으며, 폐기물처리에서는 폐기물의 68%를 리사이클하고, 32%를 에너지 회수에 충당하였으며, 버려진 쓰레기를 제로로 하는 야심적인 목표를 수립하였다.

<표 4.1> 2006 토리노동계올림픽 대회운영에서 발생한 이산화탄소배출량 (예측)

활동 (activities)	이산화탄소 배출량 (ton CO ₂ eq)	비율
토리노 수송 (비행기)	22,156	21.4
토리노 수송(철도와 도로)	818	0.8
경기장 지역 내에서의 수송	5,692	5.5
폐기물 관리	475	0.5
숙박	7,200	7.0
성화봉송	66	0.1
성화	1,570	1.5
베뉴 운영(전기)	34,919	33.7
베뉴 운영(디젤발전)	19,723	19.0
베뉴 운영(열)	10,897	10.5
총 계	103,516	100.0

<표 4.1>에서는 선수, 코치, 팀관계자, IOC위원, 심판, 언론인, 스폰서 관계자, 2006 토리노올림픽 조직위원회 관계자, 자원봉사자들은 포함시켰으나 관중(spectators)은 배출량계산에서 제외되었다. <표 4.2>는 HECTOR(HEritage Climate TORino) 프로젝트에 발표된 탄소배출량이며 교토의정서상의 원칙에 의거 제3자 검증을 받은 탄소상쇄율(offsetting rate)이 2006년 4월 현재 67.2%에 이르고 있다.

<표 4.2> HECTOR 프로젝트에서 확보한 탄소배출권 현황 (2006년 4월 현재)

파트너 (Partner)	프로젝트	배출권 유효기간	탄소배출권 (ton CO ₂ eq)
Regione Piemonte	지역 난방	4년	8,588
Regione Piemonte	지역 난방	4년	4,680
Regione Piemonte	열병합발전	2012년까지	2,292
Regione Piemonte	열병합발전	4년	32,116
Regione Piemonte	지역난방	4년	20,100
City of Pinerolo	여러 가지 프로젝트	2012년까지	896
UNEP	나무식재	4년	905
그 밖의 개인투자자	여러 가지 프로젝트	-	24
총 계			69,601

1.3 2010 밴쿠버 올림픽

2010 밴쿠버동계올림픽 조직위원회(VANOC)는 ‘온실가스 배출량 제로를 향해’(Move towards a zero emissions game)라는 슬로건을 내걸고 올림픽 유치 경합 단계부터 기후변화를 대표적인 주제로 설정하였으며, 올림픽을 탄소 중립으로 개최할 수 있는 다양한 방법들을 제시하였고 구체적인 성과를 거두었다. 올림픽의 기후변화 관리 프로그램을 설계하기 전에 구체적이고 측정가능하며 야심찬 목표를 설정하였는데 그 대표적인 것이 올림픽 선수촌을 비롯한 건물의 LEED(북미의 친환경 건축물 인증제도)

자격 획득과 올림픽 기간 중 대중교통 이용 등을 들 수 있다.

올림픽선수촌이 위치한 사우스이스트휠스크릭(Southeast False Creek)지역은 원래 운송 및 소금산업 중심지로서, 지속가능한 지역개발을 통해 새롭게 태어난 계획도로이다. 지역개발의 초기 계획단계에서 밴쿠버시는 개발 관련 영역을 지역개발 분야, 컨설팅으로 이루어진 디자인 분야, 건설분야로 세분한 후 분야별 주민공청회를 수차례 개최하여 개발방향에 대한 지역주민의 의견을 충분히 반영하였으며, 선수촌을 건설할 때 밴쿠버시는 에너지 효율관리와 재생에너지 이용에 대한 구체적인 목표로 건물의 LEED 등급 인증 획득을 설정하였다. 선수촌 건립 시 LEED 등급 인증 획득을 위한 최신 기술을 도입했으며 올림픽 경기 후 그 최신기술의 타 지역으로 확산하기 위한 노력도 기울였다. 올림픽선수촌을 건설할 때 올림픽 후 활용을 고려하여 상가빌딩, 보급형 가족빌딩, 보급형 싱글빌딩, 시니어하우스로 구분하여 개발함으로써 지역이 지속가능한 커뮤니티가 되도록 유도하였다.



<그림 4.3> 2010 밴쿠버올림픽 빌리지

<표 4.3>은 2010 밴쿠버동계올림픽 조직위원회(VANOC)에서 발표한 올림픽운영에서 발생한 이산화탄소 배출량을 예측한 것이다.

<표 4.3> 2010 밴쿠버동계올림픽 대회운영에서 발생한 이산화탄소배출량 (예측)

배출원 (emission source)	Scope (1,2,3)	배출량 (ton CO ₂ eq)	비율
성화봉송	1,3	1,505	0.5
에너지	1,2,3	29,900	9.1
지역 수송(철도 및 도로)	1,3	32,300	9.8
지역 수송(항공)	3	226,500	69.0
쓰레기	3	1,100	0.3
VANOC 행정	1,2,3	14,400	4.4
장거리 화물수송	3	11,000	3.3
경기장 건설	3	4,000	1.2
숙박	3	7,780	2.4
총계	-	328,485	100.0

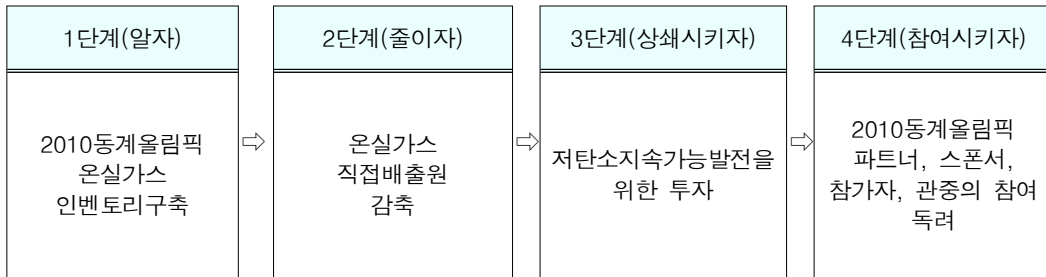
※ scope 1: 직접배출, scope 2: 간접배출(주로 전기), scope 3: 제3자에 의한 배출(예를 들면, 쓰레기처리 등)

2010밴쿠버동계올림픽의 경우 탄소상쇄 기금 마련 홍보 및 교육을 위한 다양한 프로그램의 개발 보다는 픽션무비제작, 셀럽홍보방식, 길거리 홍보 등을 전개하였으며, 올림픽 개최 직전 9개월 전에서야 본격적인 탄소상쇄프로그램 운영을 시작하여 지속적이며 효과적인 대국민 참여유도 및 홍보에 한계가 있었으며 자발적인 모금방식을 선택하였기 때문에 올림픽 탄소상쇄 모금 총액이 약 3억원에 그쳤다.

2010밴쿠버동계올림픽 조직위원회는 유치단계에서부터 기후변화를 대표적인 어젠다로 설정한 후 약 50억달러의 예산 투입하여 기후친화적인 올림픽을 위해 주요 파트너와 스폰서, 이해당사자들을 모아 토론회개최 및 개최 후 평가보고서 발간하였으며, 토론회결과는 '도전에 맞서기(Meeting the Challenge)' 보고서에 요약되어 있고 평가보고서는 '밴쿠버 올림픽 기후채점표(Climat Scorecard for the 2010 Vancouver Olympics)' 로 발행했다.

2010밴쿠버올림픽조직위원회에서는 '겨울이 없으면 동계올림픽도 없다'라는 슬로건을 내세우고(Without winter, there could be no winter games) 4단계의 온실가스

관리전략(Carbon Management Program)을 수립하고 실행하였다.



○ 1단계 : 알자(Know)

- 온실가스 배출저감을 컨설팅을 받고 온실가스인벤토리를 구축하여 올림픽경기 동안 온실가스배출량을 예측했으며 실제 측정하고 직·간접 배출량을 공개적으로 밝힘
- 2007년과 2009년에 온실가스배출 예측: www.vancouver2010.com 개시
- 실제배출량 측정: 2010밴쿠버올림픽조직위원회의 지속가능보고서에 제시

○ 2단계: 줄이자(Reduce)

- 과거 2개의 동계올림픽(솔레이크, 토리노)의 온실가스배출량을 BAU로 설정 그린빌딩, 에너지 효율화조치, 신재생에너지 사용, 녹색교통 및 대중교통 활용, 폐기물저감 등으로 온실가스 감축 달성
- BAU 대비 약 15~18% 감축 달성이 예측되었으며 15%인 57,000톤이 감축

○ 3단계: 상쇄시키자(Offset)

- 2010밴쿠버동계올림픽으로부터 직접 배출되는 온실가스를 상쇄하는 기금을 마련하여 다양한 국내외 온실가스감축사업에 투자함
- 국외의 Gold Standard 프로젝트 지원사업: New Zealand의 풍력단지, 우간다의 요리기구 효율화 사업, 중국의 수력발전, 인도의 바이오가스 발전사업, 터키의 풍력단지

○ 4단계: 참여시키자(Engage & Inspire)

- 2010밴쿠버동계올림픽 파트너 기업, 스폰서, 경기 참가자, 그리고 관중에게 자발적으로 참여할 수 있는 기회를 제공하였음

또한, 2010밴쿠버동계올림픽 기간 동안 Pulse Energy소프트웨어로 9개의 주요 올림픽경기장과 시설물에서 실시간 에너지소비량과 온실가스감축량 실시간 모니터링을 실시였다.



District Energy Utility



Canada Hockey Place for the Olympics



Vancouver Olympic/ Paralympic Centre



Neighbourhood Energy Utility



Olympic Oval



Whistler Roundhouse Lodge



Southeast False Creek Community Centre

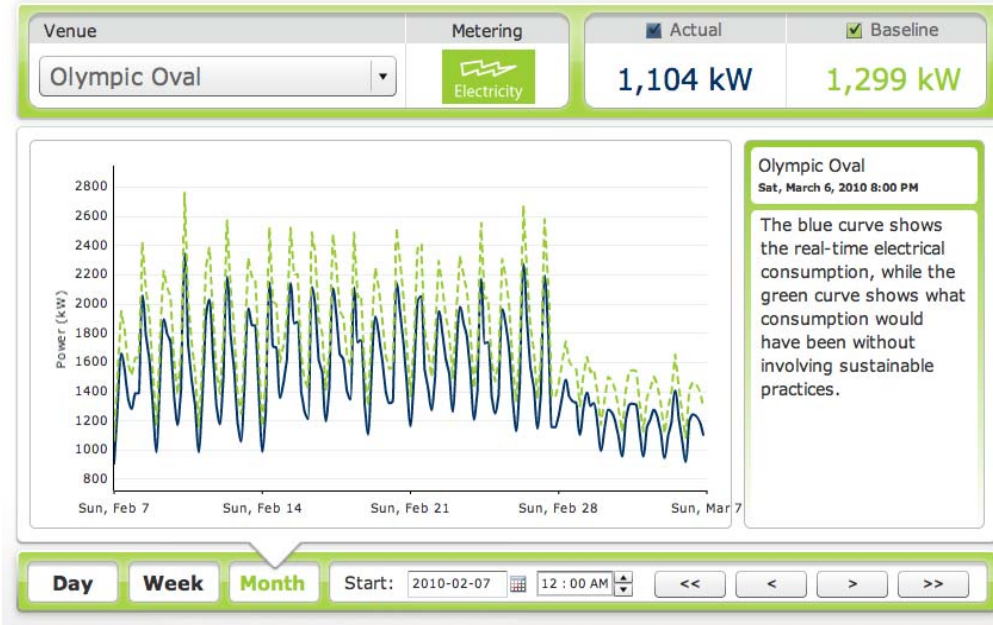


UBC Winter Sports Centre



Whistler Blackcomb Snowmaking

<그림 4.4> 2010밴쿠버동계올림픽 기간 동안 실시간 모니터링 대상 건물



<그림 4.5> 탄소배출 실시간 모니터링 예
(인용출처 - <http://www.venueenergytracker.com/project>)

2010밴쿠버동계올림픽의 탄소상쇄 총 소요비용은 \$4,927,275(약 55억원)이었다.



제2절 평창동계올림픽 환경계획

2018평창동계올림픽 비전인 “new horizons”은 IOC와 국제 스포츠계의 시대적 요구에 부응하는 독창적인 올림픽 무브먼트를 실현하고 세계 동계스포츠 역사에 새로운 지평을 열고자하는 열정을 담고 있다. 4대 목표로는 경제올림픽, 문화올림픽, 환경올림픽, 평화올림픽을 지향하고 있으며, ①선수중심 경기중심의 시설과 시스템 구축, ②최소비용 최대편익 실현, ③완벽한 안전대회 담보, ④용이한 접근 교통망 구축, ⑤참관객 편의성 극대화, ⑥성공적인 마케팅 전략추진, ⑦지속 가능한 유산 만들고 남기기, ⑧전 국민적 참여분위기 조성, ⑨국민통합과 신명의 장 마련, ⑩분단 상징지역에서 남북화해 협력의장 마련을 10대 성공조건(추진전략)으로 삼고 있다.



<그림 4.6> 2018평창 동계올림픽 슬로건

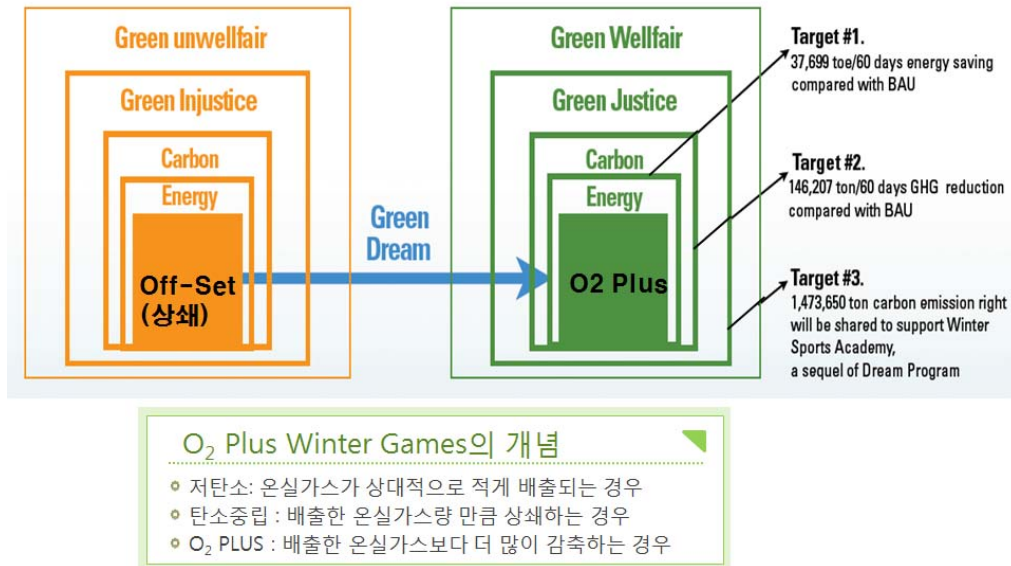
2018평창동계올림픽은 평창, 강릉, 정선 일대에서 경기가 펼쳐지며, 설상경기는 평창을 중심으로 빙상경기는 강릉을 중심으로 계획되어 있다(그림 4.7).



이미지 출처: 한국경제

<그림 4.7> 2018평창 동계올림픽 경기장

평창동계올림픽을 유치하는 과정에서 유치위원회에서는 2018평창동계올림픽 개최를 위한 저탄소 동계올림픽 특별보고서 Green Dream: O₂ Plus를 발표하며 기후변화 영향을 최소화하기 위한 다양한 부문에서의 실행계획을 제시하였다. 따라서 개최가 확정된 이후 이를 실현하기 위한 올림픽 개최계획이 수립되고 있으며 이를 통해 최고의 환경올림픽을 개최하고자 한다.



<그림 4.8> Green Dream: O₂ Plus Winter Games 개념

특별보고서(2018평창동계올림픽유치위원회, 2011)에서 제시하고 있는 분야별 온실가스 감축 목표 및 에너지 절감과 탄소배출권 확보계획은 <표 4.4>와 같다.

<표 4.4> 분야별 온실가스감축 목표

	온실가스감축 tCO ₂ /60일	에너지 절감 toe/60일	탄소배출권 확보 ton/10년	비고
신재생에너지 분야	94,857	26,046	1,430,400	
경기장 분야	8,421	11,553	43,250	
IT 분야				BAU대비 20%
교통 및 수송 분야				BAU대비 40%
물/자원 순환 분야	5,579			
Carbon Share				
기타분야				

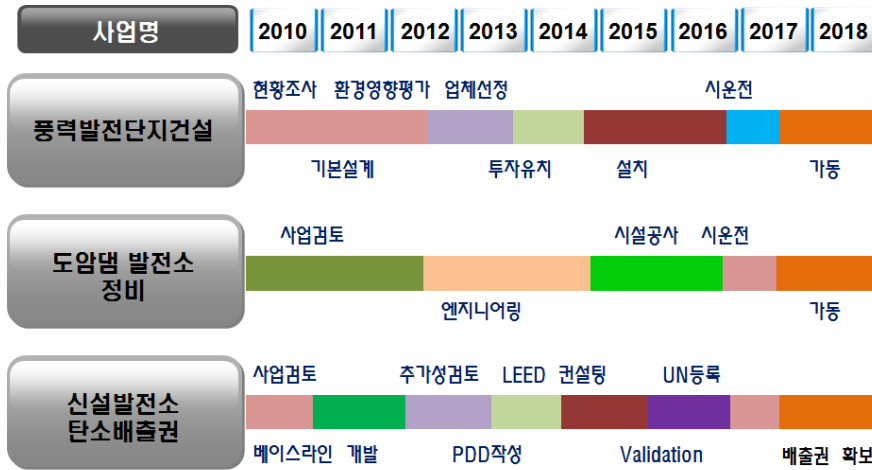
1. 신재생 에너지 분야

신재생에너지 분야의 비전은 신재생에너지이용을 통한 100% 에너지자립 실현과 기존 신재생에너지 시설사용을 통한 100% 자립 실현의 구체화, 추가적인 소규모 풍력발전단지 건설을 표방하고 있다. 올림픽 기간 중 100% 신재생에너지 자립을 실현하기 위해서는 29,984 MWh의 전력에너지가 추가적으로 필요함에 따라 100 MW의 풍력발전단지를 건설하여 부족한 전력에너지를 생산함으로써 100% 신재생에너지 자립을 구현하고, 올림픽 기간 중 온실가스 감축을 94,857톤 실행하며, 이외에 Energy Saving과 Special Target을 통해 비전을 실현하고자 하고 있다(그림 4.9).



<그림 4.9> 신재생 에너지 분야 목표

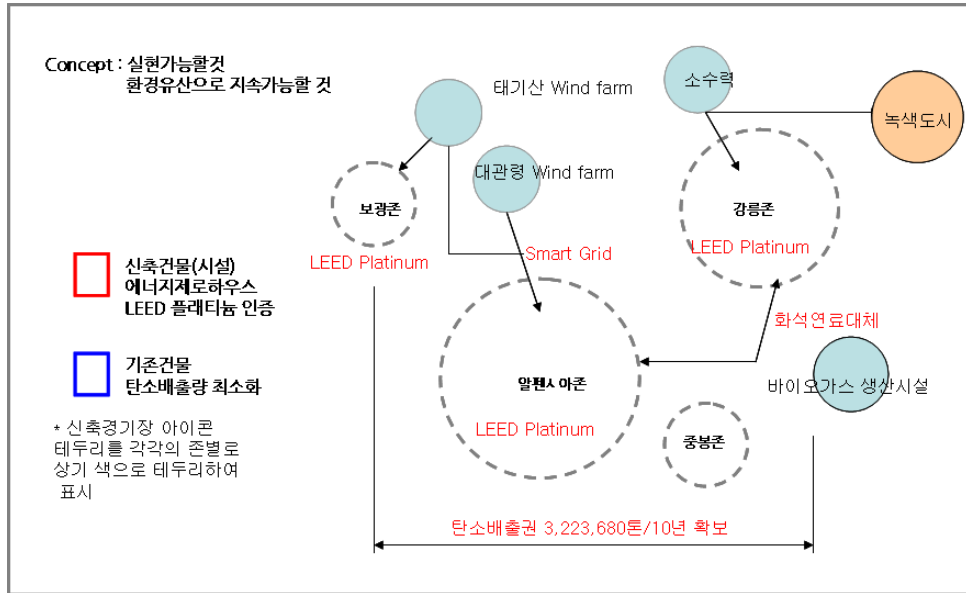
목표를 실현하기 위해서 올림픽 사이트 인근의 풍부한 풍력자원과 스마트그리드 연계사업, 도암댐수력발전소 재가동, 신설발전소 탄소배출권 확보 등의 계획을 수립하였다.



<그림 4.10> 신재생에너지 분야 사업별 로드맵

2. 건축(경기장) 분야

건축(경기장) 분야는 신축건물의 에너지 제로화와 기존 건물의 저탄소화로 크게 구분된다. 신축건물의 에너지 제로화는 아이스하키 및 선수촌 등 올림픽 추진을 위해 신규로 건설되는 모든 경기장과 숙소 등의 건물은 화석연료를 전혀 사용하지 않는 에너지제로 하우스 건물로 건설하며, 건물 내에 사용되는 냉매용 프레온계 온실가스, 폐기물 제로화를 통해서 온실가스 배출량 제로화를 목표로 하고 있다. 또한, 신축되는 모든 건물은 LEED 인증제도의 최고등급인 플래티넘 등급을 목표로 설계, 건설 추진을 통해 친환경 올림픽에 기여할 수 있도록 하였다. 기존 건물의 저탄소화는 알펜시아, 보광휘닉스파크 등 기존 건물에서 가장 많은 에너지가 사용되고, 가장 많은 온실가스가 배출되는 난방에너지를 RDF, 바이오매스 보일러로 교체하여 난방부문의 온실가스 배출량을 90% 이상 절감하도록 하며, 난방설비 및 LED 교체등 고효율 사업을 탄소배출권 제도와 연계하여 추진함으로써 탄소배출권을 확보하여, 프로모션방안과 연계할 수 있는 안을 제시하였다.



<그림 4.11> 건축 분야 Concept Design

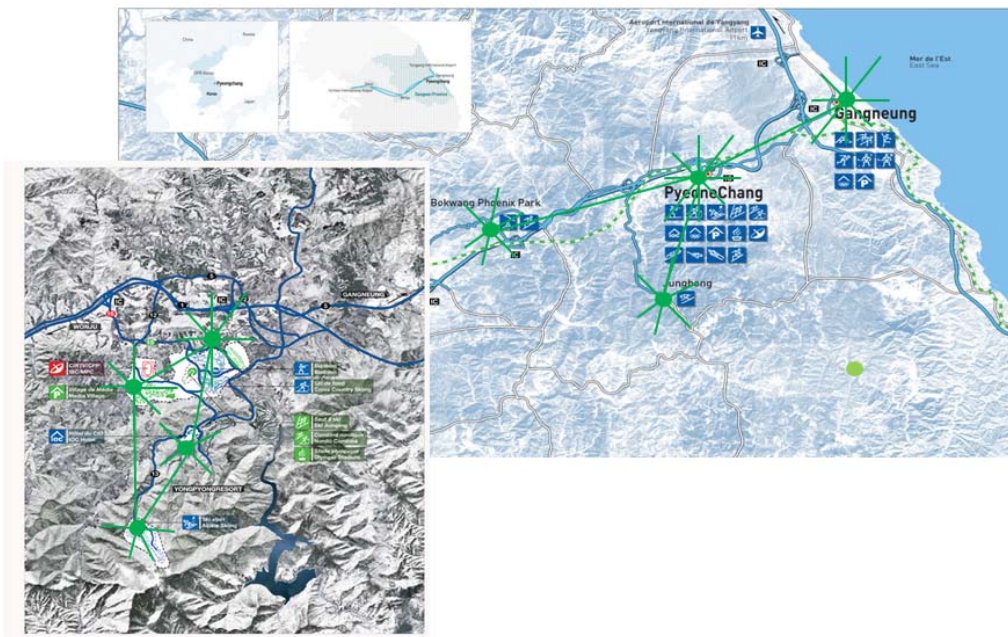
건축 분야의 기본원칙은 크게 두 가지로 첫 번째 실현가능한 계획과 두번째 올림픽 이후 환경유산으로 지속가능해야 한다는 것이다. 따라서 몇몇 신축건물은 민간부문 투자를 연계하여 이후 녹색도시와 더불어 녹색관광으로 지속되고, 기존건물은 ESCO사업으로 추진함으로써 사업의 실현가능성을 구체화 하도록 제안하였다.

사업명	2010	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
신축건물 에너지제로건축	현황조사,		기초 및 토목공사			LEED인증		
	기본설계		실시설계		건축시공		배출권신청	
기존건물 바이오매스, RDF보일러교체	현황조사		타당성평가		설비교체공사		시운전	
	투자협약		ESCO계약		CDM등록신청		가동	
LEED 플래티늄 인증 및 탄소배출권거래제도 연계	사업검토		추가성검토		LEED컨설팅		LEED인증	
	베이스라인개발		PDD작성		사업등록		배출권확보	

<그림 4.12> 건축 분야 사업별 로드맵

3. Green IT 분야

올림픽이 개최되는 모든 장소에서 소통이 가능한 IT 네트워크를 구축함과 동시에 에너지 소비를 20%정도 줄일 수 있는 녹색 정보통신기술을 구축함을 비전으로 하여 편리한 녹색 IT 기술을 활용하여 올림픽 기간 동안 2.1 M톤의 이산화탄소를 줄이고 5300 M Kcal의 에너지를 절약하고자 제시하고 있다. 이러한 녹색 기술을 올림픽 참여자의 에너지 절약 정신 고취와 다른 국가 참여자들과 친구로 소통하기 위한 녹색 친구 (Green Friend) 단말기와 에너지 소비 절약과 원격 친구를 사귀기 위한 그린 인터넷 구축의 중요성을 역설하였다.



<그림 4.13> Green IT 분야 Concept Design

사업명	2010	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Green Internet	사례조사 및 요구사항 작성			설계 및 시범 모델			구축 및 운영	
	사례조사 및 요구사항 작성			설계 및 시범 모델			구축 및 운영	
Green Home	사례조사 및 요구사항 작성			설계 및 시범 모델			구축 및 운영	
	사례조사 및 요구사항 작성			설계 및 시범 모델			구축 및 운영	
Green Data Center	사업계획			설계 및 시범 모델			구축 및 운영	
	사업계획			설계 및 시범 모델			구축 및 운영	
Green Friend	사례조사 및 요구사항 작성			설계 및 시범 모델			구축 및 운영	
	사례조사 및 요구사항 작성			설계 및 시범 모델			구축 및 운영	

<그림 4.14> Green IT 분야 사업별 로드맵

4. 교통 및 수송 분야

교통 및 수송 분야에서는 이동이 즐거운 녹색교통체계와 2010년 대비 탄소배출량 감소목표 40%를 제시하고 있다. 이를 위해 개인 통행자의 이동에 불편이 없는 녹색교통체계 구축과 편리한 대중교통시스템 및 녹색교통체계를 구축하여 온실가스를 37,350톤 절감할 계획을 수립하였다.



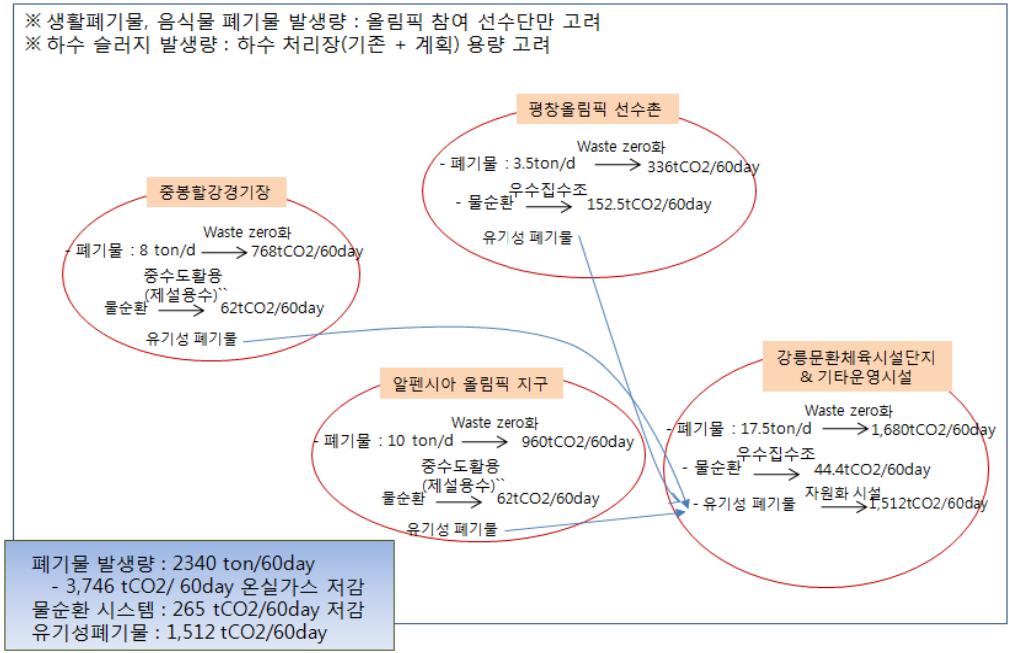
<그림 4.15> 교통 및 수송 분야 Concept Design

사업명	2010	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
대중교통 이용 활성화	원주-강릉 철도 설계			공사		개통		
	BRT 기본계획			실시설계		공사 및 개통		
친환경 차량 도입	친환경 버스 537대			920대		1,531대		
	그린카 4,977대			8,181대		14,872대		
승용차 수요 관리 방안						승용차 2부제 준비 및 시행		
	Car-sharing 사업자 선정			100대 운영		218대 운영		
저탄소 개인 이동 수단 활성화				Segway사업자 선정		Segway 1,000대 운영		
				자전거 대여 사업자 선정		무인자전거 대여 3,000대		
Low Emission Zone 설정						Low emission zone 설정		

<그림 4.16> 교통 및 수송 분야 사업별 로드맵

5. 물·자원 순환 분야

비점오염원 총량관리를 통한 수질관리, 중수 및 우수 재활용 시스템을 통한 탄소배출 저감하고 수자원 절약 등 물 재생 순환시스템을 구축하여 폐기물 자원재이용 및 재활용 분리시스템을 통한 “폐기물 발생 제로화” 모델 구축하여 온실가스 감축 및 에너지 사용을 저감할 계획을 수립하였다.



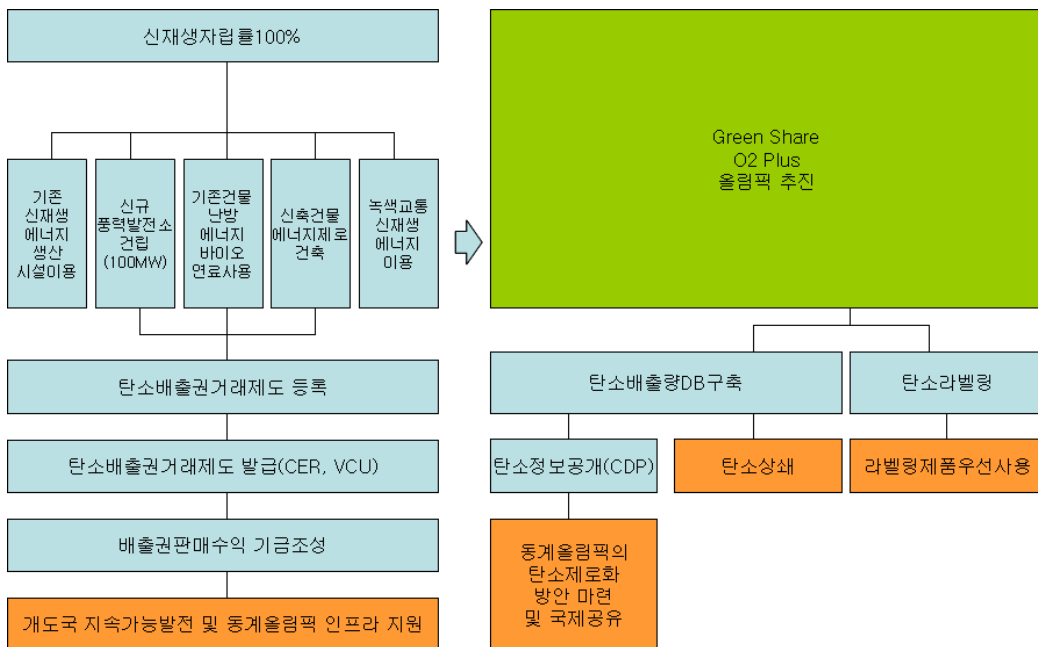
<그림 4.17> 물·자원 순환 분야 Concept Design

사업명	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
폐기물 발생 저감 시스템 구축								
	폐기물 발생 저감 프로그램 구축(R&D)			재활용 수거 체계 개선			폐기물 발생 Zero화	
유기성 폐기물 자원화								
	유기성 폐기물 자원화 시설 타당성 조사			유기성 폐기물 자원화 시스템 도입			유기성폐기물 자원화 시설 운영	
중수 및 우수 재이용								
	중수도 및 우수시설 설치 기본설계			실시설계			중수도 및 우수 이용	

<그림 4.18> 물·자원 순환 분야 사업별 로드맵

6. Carbon Share Promotion 분야

탄소 Share 프로모션 분야에서는 신재생에너지를 이용한 탄소배출권 확보와 탄소정보 공개 및 탄소상쇄(Carbon Offset), 탄소라벨링 및 탄소발자국을 활용한 계획을 제시하고 있다.



<그림 4.19> Carbon Share Promotion 분야 Concept Design

사업명				
개도국지원기금조성	기금조성방안 마련		기금사용	
	2011	2018	2019	2030
	기금조성		개도국지원사업 실시	
탄소배출량공개	탄소제로올림픽추진방안마련			
	2018	2019	2020	
	탄소배출량 DB 및 CDP		국제사회발표 및 공유	
Carbon Offset	탄소상쇄			
	2018	2019		
	탄소배출량DB			
저탄소제품우선구매	조례마련		저탄소제품우선구매	
	~ 2012	~ 2018	2019	
	보고서작성			
녹색성장 교육프로그램마련	IUTC 협력		교육프로그램운영	
	2012	~2017	2018 ~ 2020	
	교육프로그램마련			

<그림 4.20> Carbon Share Promotion 분야 사업별 로드맵

7. 기타 분야

7.1 시민참여와 지역발전

IT 강국의 기반을 통한 올림픽 경기장 시설과 지역환경관리를 지역주민과 연계·통합하여 지속가능한 저탄소형 지역발전의 사업화로 연결하며, 올림픽 개최 관계자만이 아닌 지역주민, NGO, 전문가, 행정 등이 올림픽 개최 준비단계에서부터 개최 후 활용방안에 이르기까지 적극적인 참여, 협력 프로그램 개발, 운영체계 구축할 계획을 수립하였다. 또한 지역주민, NGO 등의 자발적 참여와 협력을 통한 거버넌스 구축으로 선진시민의식의 자긍심 고취하고, 저탄소 녹색올림픽의 성공을 경기장 시설, 대회 운영프로그램, 개최도시 여건 등 관련부문의 CO₂ 인벤토리 및 저감실천 프로그램 개발 및 지

속적인 홍보, 참여유도를 제시하였다.

7.2 산림 및 자연생태 보전

다양한 참가국들에게 기후변화에 대응한 저탄소 녹색올림픽개최를 위한 나무심기 및 가꾸기 운동 (Tree Care)과 저탄소 평창 동계올림픽을 위한 인공지반 녹지 공간 조성 (Green Renovation), 동계올림픽 참가 선수 및 방문객의 심신건강을 위한 친환경 숲 치유 프로그램 제공 (Forest Therapy) 등의 계획을 제시하였다.

7.3 Green administration

탄소를 저감하며 효율적으로 행정 지원할 수 있는 시스템 구축(Supporting), 다양한 참가국들에게 기후변화에 대응한 저탄소 녹색올림픽 이미지 확립(Image Making), 평창동계올림픽 방문객들의 친환경적 행동 유도 방안 마련 (Guiding), 동계올림픽 참가 선수들에게 친환경적인 건강 및 안전관리 지원 (Nursing) 등의 계획을 제시하였다.

제 5 장

개최지 주변 기후 모델링

제 1 절 WRF 수치모형

제 2 절 모델링 실행

제 3 절 모델 결과

개최지 주변 기후 모델링



제1절 WRF 수치모형

1. WRF 수치모형의 개요

WRF(Weather Research and Forecast)는 UCAR/NCAR(University Corporation for Atmospheric Research/National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 차세대 수치모델로서 고해상도 예측에 초점을 맞추어 개발된 모델이다. 2006년 미국 기상청과 미 공군 기상대에서 현업화하여 현재 사용 중이고, 중·단기 모델에서 인지도와 정확도가 높은 모델이다. 현재 WRF 수치모형은 홈페이지(<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>)를 통해 제공되고 있으며, 본 연구에서는 WRF 버전 3.3을 이용하였다.

이 모델은 제한된 지역에서 사용할 수 있는 지역 모델로서 완전 압축성 비정수계(Fully compressible non-hydrostatic) 모형으로 수평격자는 Arakawa-C 격자체계를 사용하며, 연직격자로는 Eulerian 질량 좌표계(mass-based terrain following coordinate)를 사용한다.

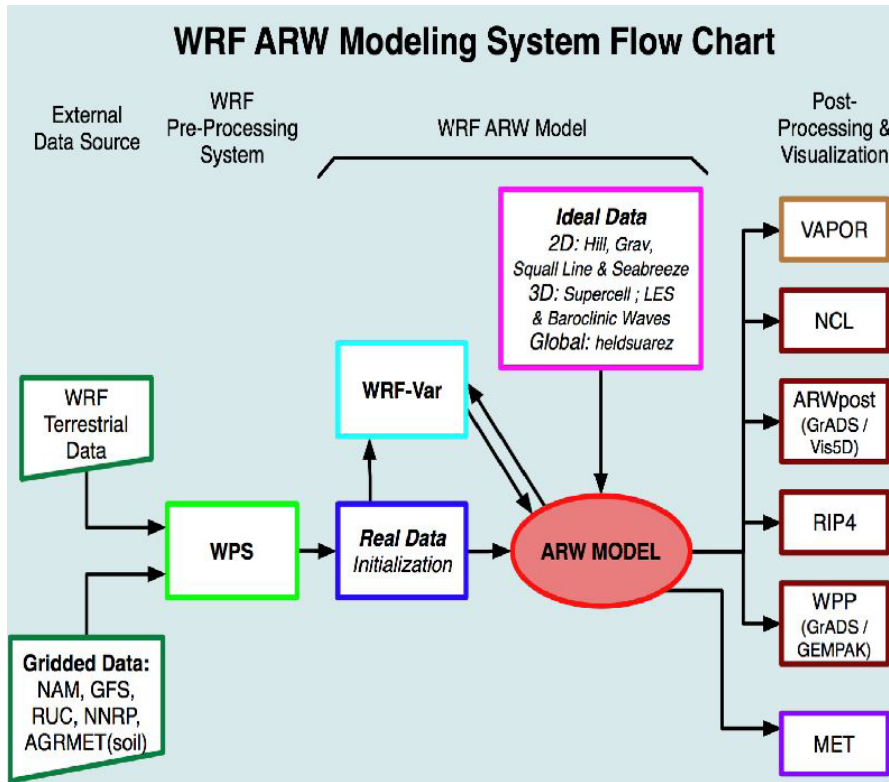
수치 계는 Runge-Kutta split-explicit 시간적분을 사용하며 이류 항에 대해서는 6차 중심 차분법을 도입한다. 또한 플렉스 형태의 진단 방정식을 사용하여 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라 양을 보존한다(Mukul, et al., 2007). 또한 관측 자료를 이용한 자료동화(3D-VAR)가 가능하고 다중격자방법으로 여러 개의 단방향, 양방향으로 등지격자를 사용할 수 있으며 미시적 물리학에 관련된 여러 가지 방법들을 선택적으로 사

용가능하게 되어있다.

<그림 5.1>은 WRF 시스템의 체계도로서 프로그램 순서와 자료의 흐름, 개별의 기본 기능을 간략하게 보여주고 있다.

지형과 토지이용도 자료는 WRF 모형의 전처리 도구인 WPS(WRF Pre-Processing System)의 GEOGRID과정을 거쳐 Terrestrial data를 생성한다. 이때 수평격자 지도 투영법을 Mercator, Lambert conformal, Polar stereograph, Cylindrical Equidistant 투영법 등이 지원되고 있다. 일반적으로 Mercator 투영법은 적도지방에서, Lambert conformal 투영법은 중위도 지방에서, Polar stereograph 투영법은 극지방에 적합한 것으로 알려져 있다. 기존에 WRF에 입력자료로 사용되었던 USGS(United States Geological Survey) 해상도 30초(900m) 지형자료는 우리나라처럼 좁고 복잡한 지형을 나타내는 지역에 있어 실제 지형과 많은 차이를 보이기 때문에 상세한 지형에 대한 기상모델의 모사에 많은 어려움이 있다. 따라서 본 보고서에서는 1초(30m) 해상도의 ASTER GDEM(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Models) 자료를 이용하여 고해상도 지형자료를 만들어 기상모델에 사용하였다.

GRIB 형식의 NCEP Global Analyses 자료는 UNGRIB 과정을 거쳐 WRF모형에서 사용할 수 있는 포맷으로 변환된다. GEOGRID 와 UNGRIB에서 생성된 개개의 자료는 METGRID 과정에서 격자체계에 맞게 기상자료가 수평내삽된다. WPS 전처리 과정을 통하여 수평내삽된 자료는 WRF 본 모형의 REAL 과정에서 기상자료를 연직내삽하여 경 경계자료과 초기자료를 산출한다. 마지막 단계인 WRF 과정에서는 REAL에서 분석된 자료를 수치 적분하여 원하는 대상기간과 대상지역에 대하여 기상상태를 모사한다. 또한 사용자의 분석에 도움을 주기 위하여 WRF의 결과를 묘화하는 postprocessing 도구(NCL, RIP4, ARWpost, VAPOR 등)가 지원되고 있다.

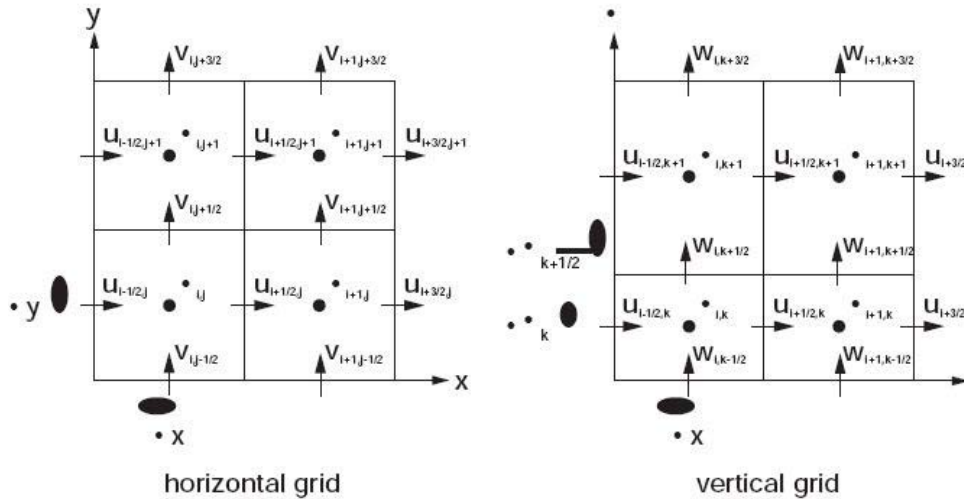


<그림 5.1> WRF Modeling system 흐름도

2. 격자체계

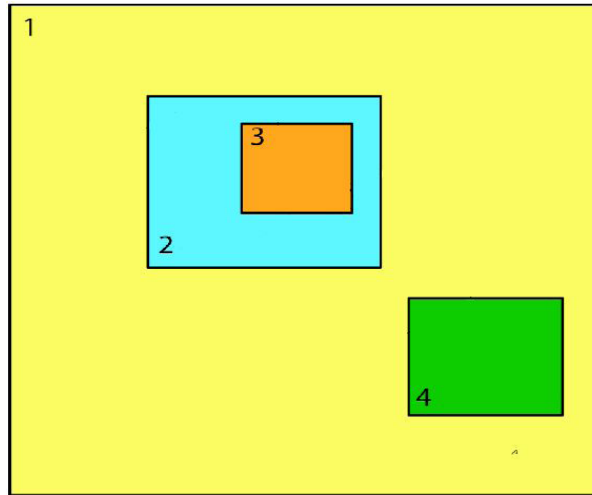
WRF 수치모형은 u, v 값을 dot-point 지점의 양 모서리 값을 내삽하는 Arakawa C-grid를 사용하며, 수직격자 체계는 σ -좌표계를 이용한다. 이 좌표계는 fine resolution 수치모의에 유리하며, 관성, 중력장, 와류 강도, 정속도 등을 고려하도록 고안되었다. 또한 WRF 뿐만 아니라 ARPS(Advanced Regional Prediction System), CMAQ(Community Multi-scale Air Quality) 등 여러 모델의 격자체계로도 이용되고 있으며, 기상모델의 결과를 입력자료로 사용하는 확산모델이나 대기오염모델의 경우 격자체계가 다른 MM5(Arakawa B-grid system)를 수용할 수 있으며, 가능한 상대적

배치는 그림3에서 보는바와 같다. nested 기법을 이용할 경우 mother domain 내에 중복되지 않는 영역 내에 multi-nesting이 가능하다. 연직격자체계로서는 Hybrid coordinate systems인 η (eta-system)격자 체계를 사용하고 있다. 이 격자체계의 특징은 상층 대기모사에 유리한 기압좌표시스템(pressure-system)과 지표모사에 유리한 시그마(σ -system)를 동시에 고려 할 수 있다. 특히 σ -좌표계는 산악 등 지형의 굴곡면을 따라가면서 (terrain following coordinate)고도에 따른 기압비율을 적용하여 세분화하는 특징을 갖고 있다($0 \leq \eta \leq 1$). 연직 좌표는 지형 및 기압을 따라 설정되는데 하층부에서는 지표면의 지형 형태를 따르고 상층부로 갈수록 평평한 것으로 정의한다 (그림 5.2).

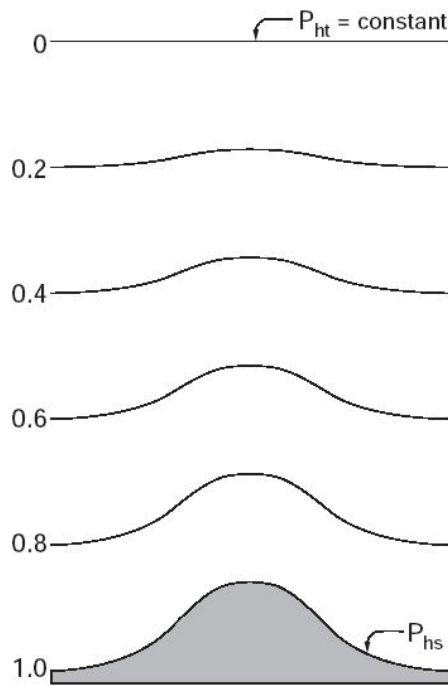


<그림 5.2> WRF 수직 및 수평 격자체계

연직격자체계로서는 산악 등 지형의 굴곡을 따라가면서(terrain following coordinate) 고도에 따른 기압비율에 따라 세분화되는 σ -좌표계를 사용한다. 연직 좌표는 지형 및 기압을 따라 설정되는데 하층부에서는 지표면의 지형 형태를 따르고 상층부로 갈수록 평평한 것으로 정의한다. 모델의 최상위층면은 0의 값을 갖고 지표면은 1의 값을 갖는다(William C. Skamarock, 2008).

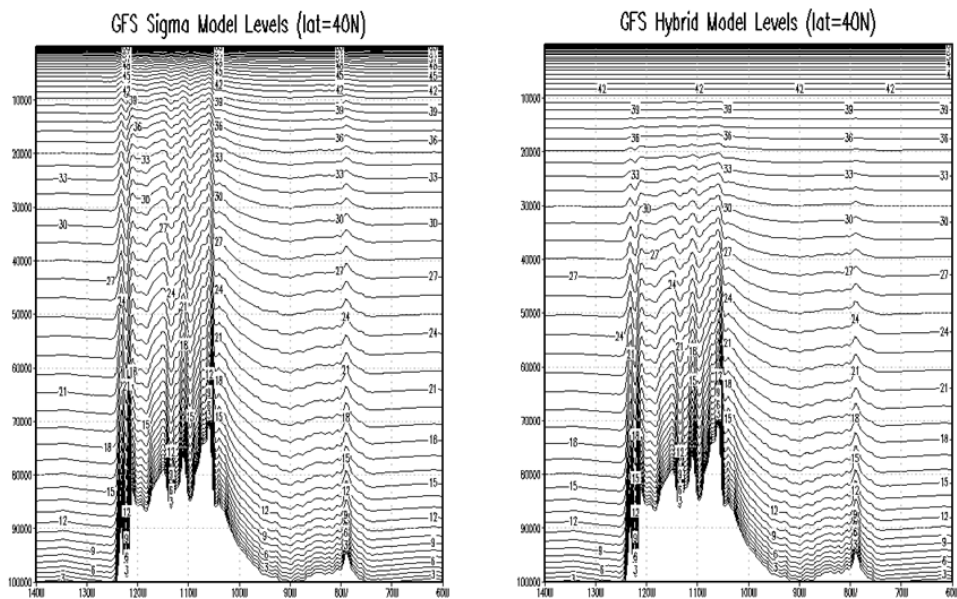


<그림 5.3> 여러 격자를 이용한 다양한 등지 격자 구성



<그림 5.4> WRF의 수직 좌표

<그림 5.5>는 연직격자체계가 서로 다른 Sigma Level과 Eta Level의 연직구조 차이를 나타낸 예로서, Sigma Level에 비하여 Eta Level의 상층을 고려한 구조가 모델 결과의 상층 묘사 능력을 실측과 가깝게 계산하고 있는 것을 나타내고 있다.



<그림 5.5 > 수직 좌표 시스템의 비교
(왼쪽 : Sigma Model Level, 오른쪽 : Eta Model Level)

3. 토지이용도

기존의 WRF 수치모형에서 사용하는 토지이용도(Land use)자료의 경우 USGS(United States Geological Survey)에서 작성한 과거의 자료이다. 이 자료는 missing 자료를 포함한 25개 카테고리로 되어 있으며, 토지이용도 타입은 흡수도(Albedo), 반사도(Emissivity), 거칠기 길이(Roughness), 최대 수분량(Moisture availability) 그리고 단위 용적당 지표면 열적 관성(Thermal inertia) 등의 물리적 성질

을 하계와 동계로 대표하여 고정된 수치를 가지게 된다.

USGS의 토지이용도 자료는 우리나라의 대부분을 나지로 분류하고 있어 지면의 특성을 충분히 반영하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 환경부(KME : Korea Ministry of Environment)에서 제공하는 토지이용도 중분류 자료를 사용하였다. 토지피복 분류도는 위성사진을 주된 자료로 사용하여 지표면의 상태를 분석 표시한 지도로서 환경 관리를 위한 전형적인 주제도로 널리 활용되고 있다. 이 지도 제작에 사용된 원격탐사기술인 토지피복 분류(Land Cover Classification)는 인공위성자료와 같은 다중분광 영상자료를 이용하여 지표면의 물리적 상태(숲, 초지, 콘크리트 포장)를 분류하는 것으로 유럽 등 선진국에서는 이미 80년대부터 국토의 환경관리를 위한 주제도 제작에 널리 활용하는 전형적인 원격탐사 기술이다. 환경부에서 작성한 토지피복분류도의 분류체계는 환경의 특성을 반영하고 국토이용, 공간계획 등의 여타 분야에서 요구하는 항목들을 반영하여 토지피복 분류 항목을 7가지로 구분한 대분류와 23가지 항목으로 구분한 중분류, 48개로 구분한 세분류의 3단계 피복분류체계로 설정되어있다(환경지리정보서비스, <http://rgis.me.go.kr/egis>). 세분류의 경우는 우리나라 모든 지역에 대하여 제공되지 않기 때문에 본 연구에서는 가장 최신의 2차 갱신 중분류(1초 해상도) 자료를 사용하였다.

토지이용도의 차이는 기온, 강수, 엽면적지수, 일사, 토양수분보유량, 토양 호흡 등에 영향을 주게 되며(국립환경과학원, 2005), 이러한 변화는 국지기상 조건을 변화시키기 때문에 얼마나 실제에 가까운 자료를 입력하느냐에 따라 모델 결과에도 변화를 줄 수 있다.

〈표 5.1〉 USGS 와 KME의 토지이용도 분류 비교

identification	land cover map by USGS	Middle classification by KME
1	Urban	Residential area Industrial area Business area Amusement facilities Traffic area Public facilities
2	Dryland Crop Pasture	Dryland crop field Irrigation crop field House cultivation field Orchard Other cultivation field
3	Irrigated Crop Pasture	
5	Crop/Grass Mosaic	
6	Crop/Wood Mosaic	
11	Deciduous Broadleaf Forest	Deciduous broadleaf forest Coniferous forest Mixed forest
14	Evergreen Needleleaf Forest	
15	Mixed Forest	
7	Grassland	Grassland Golf field Other grassland
17	Herb Wetland	Inland Wetland
18	Wooded Wetland	Coastal Wetland
23	Bare ground	Mine area Other bare ground
16	Water Bodies	Inland water bodies Sea water bodies

4. WRF 모델의 활용 예

수치예보모형(Numerical Weather Prediction Model)은 바람, 기온 등과 같은 기상 요소의 시간 흐름에 따른 변화양상을 예측한다. 일반적으로 수치예보는 먼저 대기 공간을 일정한 크기의 상자로 나누고 여기에 현재의 관측된 기상요소를 정해진 형태로

바뀌서 입력하여 컴퓨터로 지구를 둘러싸고 있는 대기의 운동을 지배하는 물리적 법칙을 수치적으로 계산하여 앞으로의 날씨가 어떻게 변화하는지 알려준다.

이러한 수치모형의 하나인 WRF는 한반도에서 발생한 특이기상에 대해 이지우와 홍성유 (2006)는 2005년 6월 양평군 양동에서 나타난 집중 호우 사례에 대한 수치실험을 실시하여 한반도의 복잡 산악지형의 집중호우에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, Lim and Hong (2007)은 2005년 호남지역에서 발생한 폭설 현상에 대한 수치실험을 수행하여 서해의 해면온도가 호남 지역 폭설에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 사례도 있다. Shin and Hong (2009)은 2007년 태풍 나리에 의해서 발생한 제주도의 강수 현상에 대한 수치실험을 실시하여 WRF 모델에서 영역크기, 모조 태풍의 모의 방법, 등지격자 체계, 물리 과정의 변화가 강수에 미치는 효과를 분석하였다. Lee and Choi (2010)는 2002년 태풍 루사로 인해 발생한 기록적인 강우를 WRF 모델을 이용하여 모의하였으며, 보거싱 효과가 태풍의 진로와 강수에 미치는 영향을 확인하였다. Lee et al. (2011)은 영동지역의 강설 현상을 강설 집중구역에 따라 구분하고 WRF 모델을 이용하여 각각의 강설 구조를 분석하였다. 또한 공군에서도 WRF 모델을 기반으로 한 단기 수치 예보 시스템을 운영하는 연구가 수행되어 왔다.

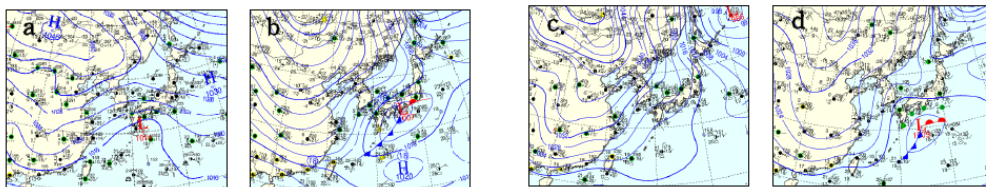


Fig 2 surface chart at (a) 00 UTC 21 December 2002, (b) 00 UTC 12, (c) 00 UTC 13 January 2008 and (d) 00 UTC 11 February 2011.

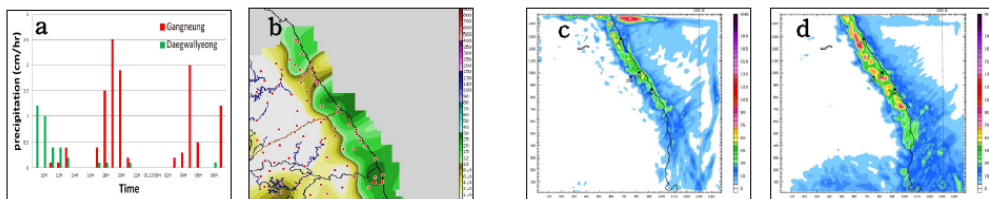


Fig 3 (a) The time series of hourly precipitation observed from AWS at Gangneung and Daegwallyeong, (b) The observed 24-hr accumulated precipitation from AWS over Yeong-dong area, simulated 24-hr accumulated precipitation valid using (c) One-way nesting and (d) Two-way nesting.

<그림 5.6> WRF 모델 활용 사례1 (Lee et al, 2011)

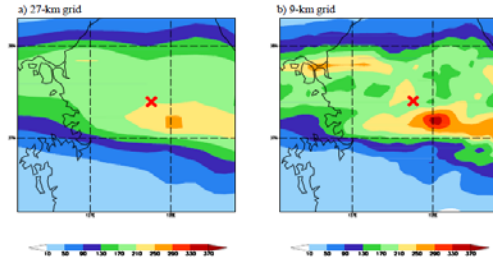


Fig. 12. The same as in Fig. 8, except for the (a) 27-km grid and (b) 9-km grid.

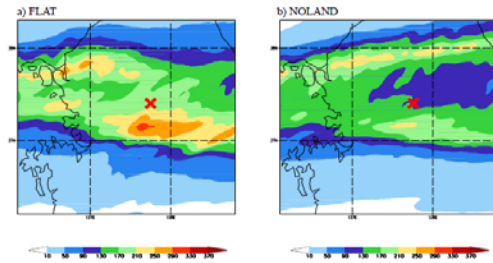


Fig. 13. The same as in Fig. 8, except for the (a) FLAT and (b) NOLAND experiments.

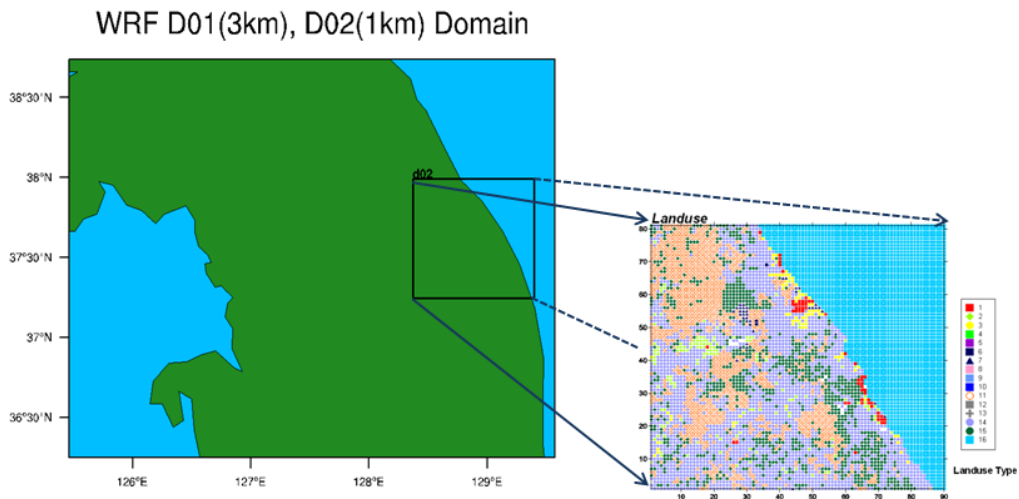
<그림 5.7> WRF 모델 활용사례2
(이지우, 홍성유 2006)



제2절 모델링 실행

1. 모델링 영역 및 대상기간

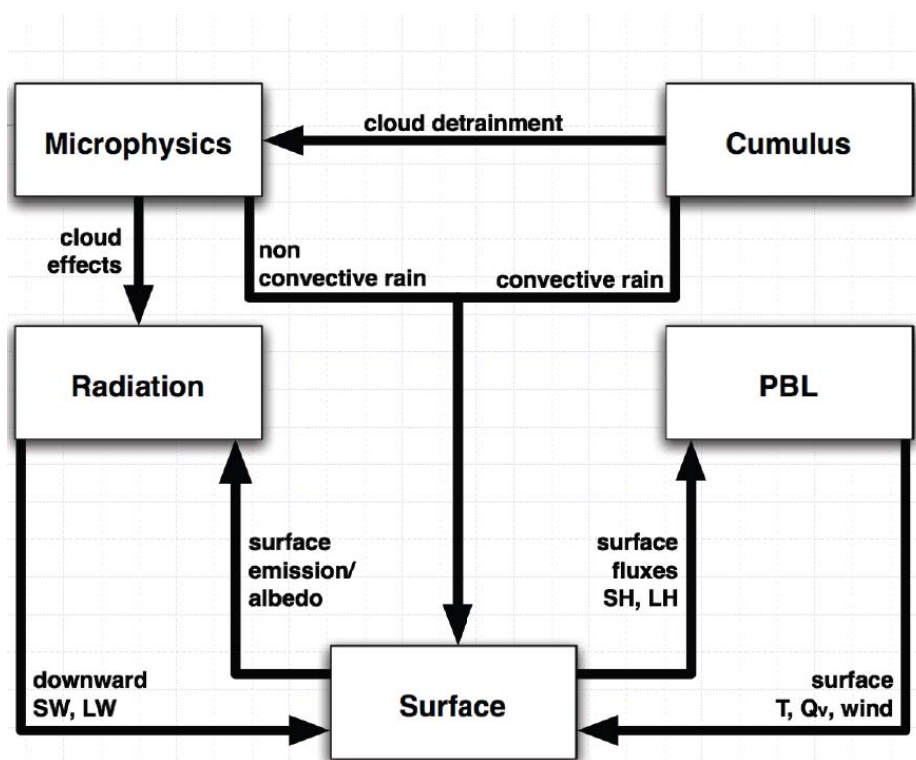
WRF 모델링은 등지격자 도메인을 이용하여 Lambert-conformal 격자 투영법을 대상지역을 포함한 한반도 중부지역의 기상장의 수치모의를 실행하였다. 대상영역은 3km 해상도의 한반도 중부지역에서 nesting 과정을 거쳐 동계올림픽이 열리는 강원도 동쪽지역인 강릉지역을 대상으로 1km 해상도로 설정하였다. 도메인 영역은 그림 8에 나타내었다. 초기자료와 경계 자료는 격자간격 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 인 NCEP/FNL(Global Final Analysis) 자료를 이용하였으며, 대상기간은 구름이 끼지 않은 맑은 날을 선정하여 동계올림픽이 열리는 기간인 2월 중 2012년 2월 5~11일 총 6일간 실행하였다. 모델링 실행 이틀은 모델 안정화를 위한 pre-run 기간으로 결과분석에는 제외하였다.



<그림 5.8> 모델링 도메인 영역(3km, 1km)

2. 물리적 옵션 적용

WRF 모델에서 사용된 물리과정은 구름물리과정(MPS; Microphysics Scheme)으로 WSM6(WRF Single-Momentum 6-class-Microphysics scheme)을 적용하였고, 행성 경계층(PBL; Planetary Boundary Layer) 모수화 방법은 YSU-PBL 옵션을 사용하였다. 또한 장파복사(Long wave-radiation)에 대해서는 RRTM(Rapid Radiation Transfer Model)을, 단파복사(Short wave-radiation)에 대해서는 Dudhia scheme을 사용하였다. 적운모수화는 NOAH-LSM(Land Surface Model)이 사용되었다.

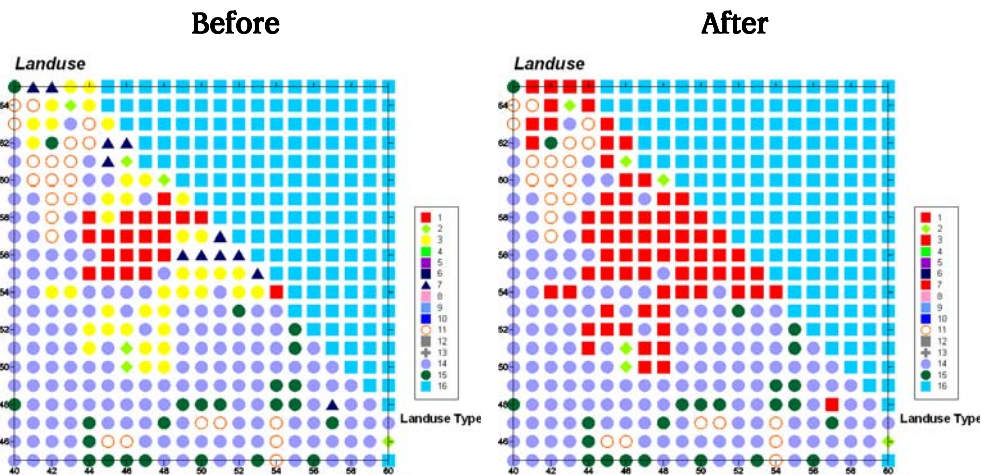


<그림 5.9> Parameterizations의 직접적인 상호작용(Jimy Dudhia, 2008).

3. 토지이용도의 변화

2018년 평창 동계올림픽에 의한 지역 개발, 발전 등으로 도시화가 진행됨에 따라 기상조건에는 어떤 변화가 나타나는가를 알아보기 위해 평창 동계올림픽의 개최 도시 중에 하나인 강릉시를 중심으로 WRF 모델링을 실행하였다.

우선 강릉지역을 중심으로 올림픽 개최로 인한 변화를 살펴보기 위해 토지이용도에 변화를 주었다. 올림픽 개최 전 강릉의 토지이용도는 도시와 논, 산림 등으로 이루어져 있으며, 개최 후는 도시 주변의 논과 산림 지역을 인위적으로 모두 도시로 바꾸어 설정한 후 모델을 실행하였다. 토지이용도를 논이나 산림에서 도시로 바꿀 경우 모델에서 여러 가지 수치 계산에 사용되는 parameter의 값들이 도시에 해당하는 값으로 설정되며, 모델에서는 도시로 간주하고 계산을 하게 되므로 토지이용도 변화에 따른 도시화 효과를 살펴볼 수 있다.



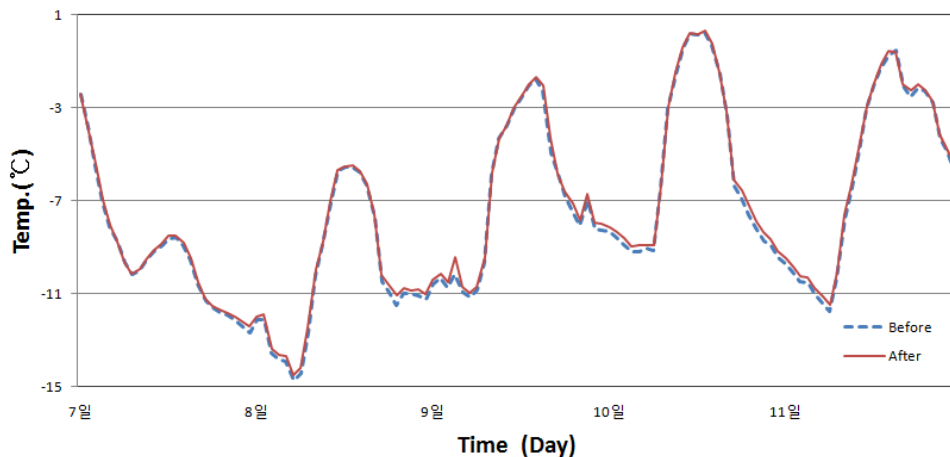
<그림 5.10> 강릉지역의 토지이용도 변화



제3절 모델 결과

1. 시계열

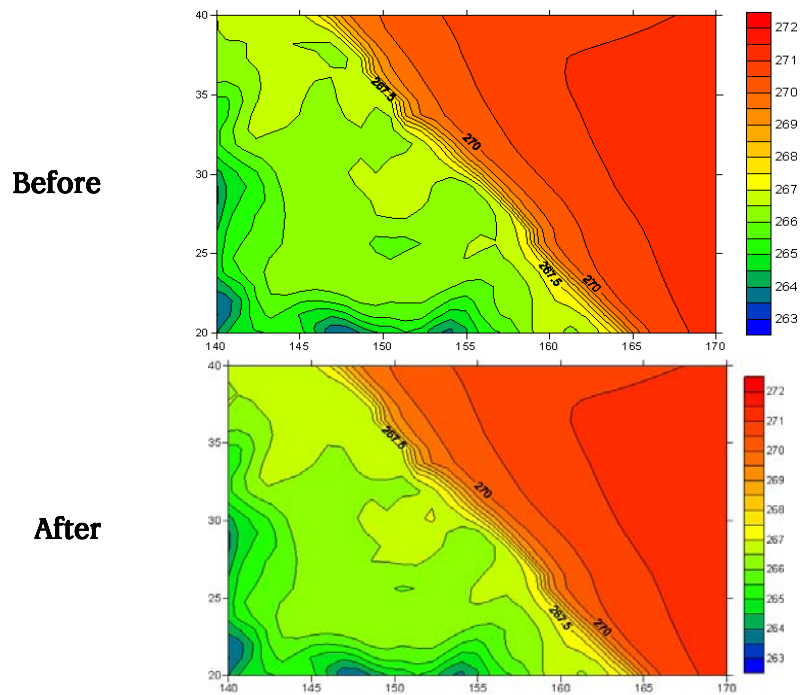
2012년 2월 7~11일 총 5일간 WRF 모델을 이용한 강릉지역 개발 전·후 기온의 시계열을 나타내었다(그림 VI-11). 점선은 토지이용도를 도시로 바꾸기 전, 점선은 바꾼 후를 나타낸다. 전체적으로 낮 동안에는 기온의 차이가 거의 없었으나 야간에는 기온이 상승하는 것으로 나타났다. 대체로 개발 후에 야간 기온이 약 0.2°C 정도 상승하였으며 가장 많이 상승한 경우는 9일 새벽으로 약 0.74°C 정도 상승하였다. 지구의 평균기온이 지난 100년간 0.74°C 오른 것에 비하면 상당히 높은 상승률을 나타낸 것이다. 이러한 야간 기온의 상승은 도시화의 대표적인 현상인 도시열섬 현상으로 나타날 수 있으며, 특히 동계올림픽의 경우, 기온에 크게 영향을 받기 때문에 중요하다고 할 수 있다.



<그림 5.11> 강릉지역 개발 전·후 기온 모사결과 시계열(2012년 2월 7~11일)

2. 수평분포

같은 대상일인 총 5일간의 결과를 평균하여 1km 도메인 영역의 기온 수평분포를 나타내었다(그림 VI-12). 전체적으로 기온이 약간 상승하였으며, 토지이용도를 변화시킨 강릉지역을 중심으로 기온이 상승한 것을 볼 수 있다. 기온이 상승함에 따라 나타나는 현상들은 많은 경제적 손실을 가져올 수 있다. 지난 벤쿠버 동계 올림픽 때는 평년보다 높은 기온으로 산 위에 눈이 녹아 엄청난 양의 눈을 다른 곳에서 옮겨오는 일도 발생하였다. 따라서 개최지 주변의 정확한 기후변화의 파악을 위해 지속적인 기상 모니터링이 필요할 것으로 사료된다.



<그림 5.12> 강릉지역 개발 전 · 후 기온 모사결과 수평분포(2012년 2월 7~11일)

3. 기후모델링의 필요성

본 장에서는 올림픽 개최지 주변인 강릉지역에 대해 WRF 기후모델링을 실시하였다. 토지이용의 변화에 따라 지역 미기후는 영향을 받게 되는데 현재 진행되거나 계획 중인 올림픽 계획들은 개최지 주변의 토지이용도를 변화시키게 된다. 따라서 지역 미기후에 많은 영향을 미칠 것이 확실시 되고 본 연구 결과에서도 알 수 있었다. 따라서 평창과 강릉 등 개최지 주변의 올림픽 계획이 모두 수립된다면 지역 기후 모델링을 통해 미기후의 영향에 대한 검토가 꼭 필요할 것으로 사료된다.

제 6 장

기후모니터링 방법

제 1 절 기후모니터링

제 2 절 기후관련 동계올림픽 지원 계획 조사

제 3 절 모니터링 위치선정 방법론

제6장

기후모니터링 방법



제1절 기후모니터링

1. 기상 모니터링

온실가스 감축에 따른 환경 영향을 분석하기 위해서는 올림픽 개최지 주변 지역에 대한 기상현상을 비롯한 기후 변화 영향 모니터링이 필요하다. 지표기상측정은 시간별 풍향, 풍속, 기온, 습도, 일사량 등을 측정하는 것으로 택지개발 영향평가 시 부지기상을 측정하며, 환경영향평가 시에는 부지기상의 현황을 분석하고 보다 자세한 분석을 위한 대기질 모델링 입력 자료로 활용하기 위해 지표기상 측정이 이루어지고 있다.

기상측정 관측 장비는 주변 지장물이나 환경의 영향을 최소한으로 받는 곳에 설치되어야 하며, 어떠한 계획이나 정책을 통한 특정지역의 기상 변화를 보다 명확하게 파악하기 위해서는 기존에 설치되어 운영 중인 기상청 자동기상관측장비(AWS) 이외에 파악하고자 하는 지점에 관측 장비를 설치하여 측정하는 경우도 있다. 기상측정 방법은 여러 가지가 있다.

1.1 자동기상관측 장비(Automatics Weather System; AWS)

자동기상관측 장비(AWS)는 약 80개의 정규 기상관측소와 함께 국지 기상 관측을 위해 기상청에서 운영 중인 장비이다. 1988년 서울올림픽 기상지원용으로 15대를 도입하여 운용한 것이 계기가 되어 1990년에서 1994년까지 방재용 AWS를 400대를 설치하고 노후화된 장비에 대해 연차적으로 교체사업을 하고 있다.

자동기상관측 장비에서 수집된 자료는 종합 자기기록의 실시간 영상표출로 일변화 경향감시 및 분석이 가능하며, 소규모 돌발성 악기상을 연속 감시하여 방재기상지원 능력을 향상시키고, 국지적 상세예보모델의 개발과 연구 분야에서 필요로 하는 기초자료를 확보하는 목적이 있다.

현재 전국 539개소로 구성되어 있으며, 소규모 국지기상감시의 관측을 위한 도서지역과 산간등지에도 설치 운영 중에 있다. 그러나 자동기상관측 장비들은 대부분 거주지 주변에 설치되었고, 상대적으로 산악지역에 설치된 자동기상관측 지점 수는 매우 적은 편이다. 우리나라 자동기상관측망은 관측환경 측면에서도 표준화가 되어있지 않은 경우도 많고, 전문 관리 인력의 부족으로 자료가 누락된 경우가 많다.



<그림 6.1> 자동기상관측 장비(Automatics Weather System; AWS)

1.2 소형 기후기록장치(HOBO)

HOBO는 기기 종류마다 약간의 차이가 있지만 측정시간이 1초에서 18시간까지 조절 가능하고 수은건전지를 사용하며, 수명은 1년이다. 측정온도는 -20°C 에서 70°C 까지로 $\pm 0.47^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위를 가진다. HOBO가 태양 복사의 직접적인 영향을 받게 되면 기온이 실제보다 높게 측정될 수 있기 때문에 Radiation Shield를 만들어 직접적인 영향을 차단하는 것이 좋으며, 설치 시 벽과 바로 맞닿거나 건물에 의해 그늘이 지는 지점은 피하여 주변으로부터 받을 수 있는 직, 간접적인 영향을 최대한 배제하여야 한다.



<그림 6.2> 소형 기후기록장치(HOBO)

1.3 휴대용 온·습도 측정기

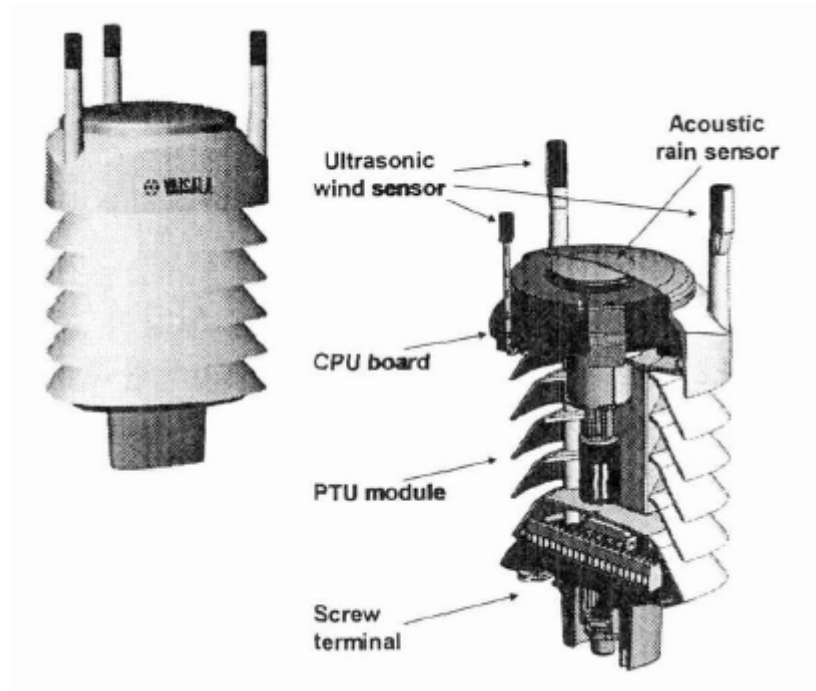
휴대용 온·습도 측정기는 장비 한 대로 온도, 습도, 노점, 습구온도 등 다양한 요소를 측정할 수 있으며, 측정된 값을 바로 확인 할 수 있는 디스플레이가 장착되어 손쉽게 측정 값을 확인 할 수 있다. PC와 USB로 연결되어 프로그래밍도 가능하며 측정한 데이터를 다운로드 할 수 있다. 휴대용 온습도 측정기는 이해하기 쉬운 작동법과 메뉴로 사용자로 하여금 보다 쉽게 제품을 사용 할 수 있으며, 정확도도 비교적 높다.



<그림 6.3> 휴대용 온·습도 측정기

1.4 통합기상관측장비(WXT510)

통합기상관측장비는 작고 가벼운 멀티 센서 기상 트랜스미터로써, 풍향, 풍속, 기압, 온도, 상대습도를 측정한다. 이 장비는 한 개의 기기에 다양한 센서를 제공하여, 손쉬운 기상 스테이션의 제작을 가능하게 하며, 여러 주요 기상 파라미터의 측정을 한 개의 기기로 관측할 수 있도록 제작되었다. 또한 작고 견고하며, 설치가 간편하고, 통합이 손쉬우며, 기계적으로 움직이는 부품이 없으므로 최소의 유지보수를 필요로 한다. 또한 여타의 AWS보다 현저히 낮은 소비전력과 넓은 공급 전력 범위를 가지며, 유연한 serial 출력을 가지고 있어 여러 통신 설정이 가능하다(방기석 등, 2005).



<그림 6.4> 통합기상관측장비(WXT510)의 구조

2. 이산화탄소 모니터링

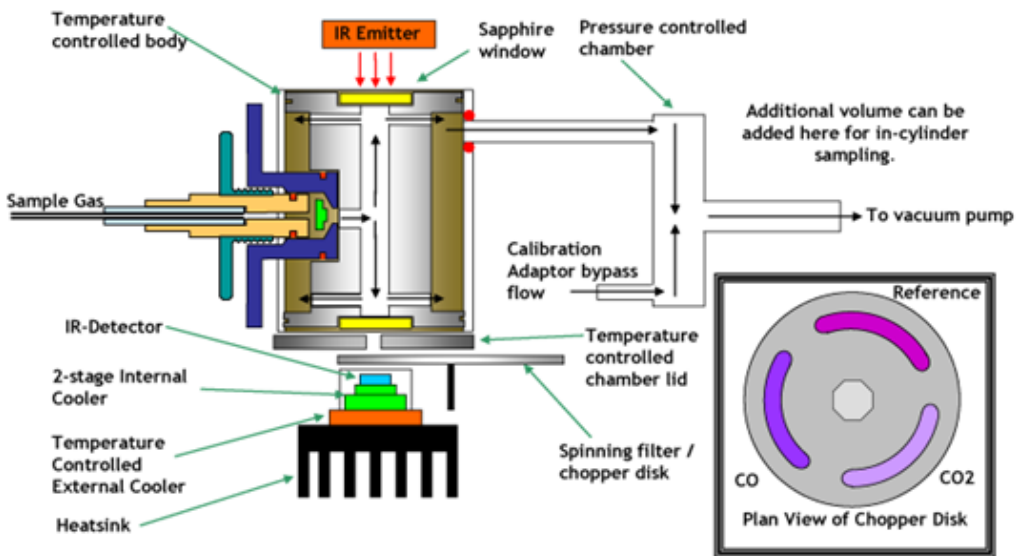
지구대기의 1%를 구성하는 이산화탄소 등의 온실가스는 지구에 들어오는 짧은 파장의 태양에너지를 통과시키는 반면, 지구로부터 나가려는 긴 파장의 적외 복사에너지는 흡수하여 지구온난화의 원인이 된다. 따라서 기후변화 영향을 알아보기 위해서 이산화탄소의 모니터링이 필요하다.

2.1 비분산 적외선 분석계(Non-Dispersive InfraRed analyser; NDIR)

비분산 적외선 분석계는 배기가스 분석 장치의 한 형식이다. 일반적으로 다원자 분자는 어떤 특정 파장의 적외선을 흡수하는 성질을 갖고 있어 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 등의 2원 분자에서는 원자 간의 진동, 회전에 따라 적외선 에너지가 흡수된

다. 가스상 물질의 흡수도는 Lambert-beer 법칙에 따른다.

이 장치의 원리는 광원에서 방출되는 넓은 파장의 적외선이 광학섹터에서 광학필터를 거치며 특정 적외선 파장을 불활성기체가 충전된 기준 셀과 시료 셀을 번갈아 통과시키게 되는데 기준 셀은 적외선 파장이 모두 통과하고 시료 셀에서는 CO에 의해 흡수가 일어나게 된다. 이때의 흡수도를 검출기에서 검출하고 농도를 측정하게 된다.



<그림 6.5> 비분산적외선분석계의 구조

2.2 휴대용 이산화탄소 측정기

일산화탄소 및 이산화탄소 이외에 온습도를 측정할 수 있는 측정기로서 다점 측정 기능이 있으며, NDIR CO₂ 센서 채용으로 안정적이며 정확하게 측정이 된다. 모든 측정 파라미터를 날짜, 시간 정보와 함께 동시에 기록되어 PC로 전송할 수 있다. 통계기능을 이용하여 최고, 최저, 평균값 등 쉽게 확인 할 수 있다.



<그림 6.6> 휴대용 이산화탄소 측정기



제2절 기후관련 동계올림픽 지원 계획 조사

기후와 관련된 2018평창동계올림픽 지원계획은 주로 기상청의 2018평창동계올림픽 조직위원회를 통해 이루어질 계획으로 조사되었다. 이외에 산림청, 농어촌 공사 등에서도 비공식적인 계획을 준비 중인 것으로 파악되었다. 연구과정 중 조사된 올림픽 지원 사업들은 대부분 사업 준비단계로서 본 보고서 수록된 내용은 사업계획서 내용을 요약한 것이다.

▣ 동계스포츠 및 레저 지원 기후정보 개발

1. 주관기관 : 강원지방기상청

2. 사업목적

- 2018 평창동계올림픽 개최지확정, 국가브랜드 제고의 역사적인 기회로 평창이 세계적인 겨울 관광지로 부상
- 동계올림픽의 성공적인 개최와 관광 활성화를 통한 경제효과 극대화를 위해 겨울철을 우선 타깃으로 한 동계 스포츠 및 레저 지원 기후정보 제공

3. 사업내용

- 강원지역 관광기후자원의 미래전망정보 생산
 - RCP 기후변화시나리오 기반의 기온, 강수량 관련 관광기후자원의 미래전망정보 생산
- 강원지역 동계 스포츠 지원을 위한 기후정보 개발
 - 지역 동계 스포츠 지원을 위한 스키관련 기후지수 개발
 - 스키관련 기후지수에 대한 미래전망정보 생산
- 강원지역 동계 지역축제 지원 기후정보 개발
 - 동계 기후에 민감한 지역축제(눈축제, 산천어축제)를 지원하는 기후정보 개발

- 동계 지역축제 지원 기후정보의 미래전망정보 생산
- 관광기후지수(TCI)의 미래전망정보 생산
 - RCP 8.5 및 RCP 4.5 시나리오 하에서의 미래전망정보 생산
- 강원지역 동계 관광에 적합한 쾌적지수 개발
 - 기후DB를 활용한 경험식 산출, 동계 관광에 적합한 쾌적지수 생산

▣ 평창동계올림픽 스마트 기상지원 환경 시범구축

1. 주관기관 : 기상청, 2018평창동계올림픽대회 조직위원회

2. 사업목적

- 2018 평창동계올림픽은 전세계에 우리나라가 IT 강국임을 다시금 펼쳐 보일 수 있는 기회로써, 그에 걸맞는 IT 인프라와 서비스 환경 조성이 필요
- 특히 동계올림픽은 기상현상이 경기에 미치는 영향이 크므로 성공적인 대회 운영을 위해서 시의성 있는 기상정보 지원이 매우 중요
- 또한 입체적이고 정확산 기상 관측을 요하는 동계올림픽을 지원하기 위해서는 첨단 IT기술이 가미된 u-관측환경 구성필요
- IT 기술발전과 정보이용 매체의 다양화 추세에 따른 접근성과 유용성 높은 스마트 기상정보서비스 필요

3. 서비스 내용

서비스이용 대상자	서비스 개선 전	서비스 개선 후
동계올림픽 선수단 및 임원단	○ 강원도의 기상실황 및 예보 자료 이용	○ 동계올림픽 개최지(평창) 및 지역별 경기시설들에 특화된 조밀 기상관측자료 및 상세 예보 자료를 이용하여 경기진행 여부 결정 등에 활용 ○ 다양한 장소(경기장 주변, 프레스센터, 선수촌 등)에서 목적별 실시간 기상정보 서비스 이용
교통관리요원	○ 강원도의 도로교통 상황 정보 이용	○ 동계올림픽에 특화된 실시간 도로교통기상 정보를 바탕으로 선수 및 임원단, 관광객, 관련 장비 등의 최적 이동 경로 결정
관람객 및 관광객	○ 기상청 홈페이지 또는 일반적인 날씨 정보 서비스 이용	○ 이동경로별 실시간 도로교통기상정보 및 경기장별 상세 기상정보 서비스 이용 ○ 주요 지점에 설치되어 있는 스마트 정보표출장치(DID) 등을 통해 맞춤형 서비스 이용

4. 기대효과

□ 정량적 기대효과

- 동계올림픽 기상관측 지점수 증가
 - 경기장 주변 기상관측 장비수 : 현 4개 지점 → 24개 지점(2012년 기준)
 - ※ 기상관측표준화법에 의한 공동활용기관 관측지점(지자체 운영) 제외
- 기상정보지원 절차 간소화로 인한 처리단계 감축
 - 기존(8단계) : AWS→전용회선→터미털서버→국지수집장치→지방기상청→본청 통합DB→유관기관지원시스템→올림픽지원시스템(가칭)
 - 개선후(4단계) : AWS→사물지능통신→수집·분배시스템→올림픽지원시스템(가칭)
- 도로교통 혼잡비용 절감을 위한 도로교통 기상 정보 생산
 - 기존 : 0건
 - 개선후 : 주요 도로 3개 지점 매 10분자료 생산 : 일 432건(2012년 기준)

□ 정성적 기대효과

- 그동안 수행하였던 각종 국제대회의 단순 기상지원을 넘어서 최초로 u-IT 기술을 활용한 동계스포츠 경기장 및 도로교통 기상 지원
 - 최고수준의 관측망 구축을 기반으로 상세 기상예측정보 생산기술 개발 및 예측 정보 실시간 검증 기반 구축
- 평창, 강릉, 정선 지역 등 올림픽경기 시설별로 구축된 관측·예보·정보전달 체계를 세계최고 수준의 관광기상 서비스에 활용
 - 특화된 산악·도시기상 서비스 발전에 기여
 - ※ 올림픽 이후 10년간 약 32조 2,000억원으로 추정되는 추가 관광수요 (현대경제연구원, 2011.7.6)에 대한 기상지원 가능
- 개발 및 효과가 입증된 산악·도로 기상서비스 기술은 이후 전국 산악·도로에 적용 가능
 - 특히 올림픽 경기에 특화된 기술은 강원도와 다른 지역의 유사 동계스포츠·레저 시설에 적용 가능 ⇨ 기상서비스 산업계로의 기술이전
- 향후 대규모 동계스포츠행사 유치국에 기상기술력 수출
 - 국내 기상산업체의 해외진출 확대와 함께 세계 최고수준의 기상기술 선진국 위상 확보

▣ 2013-2018 평창동계올림픽 기상지원서비스 계획 - 대관령 기상대

1. 평창동계올림픽 스마트 기상지원 환경 구축

- U-관측망 및 경기장내 독립형 기상관측 센서 구축



- 도로교통 기상정보

· 시정, 현천, 노면감지, CCTV를 통한 관측과 도로 구간별 동네예보를 합하여 주요 도로에 대한 현재 기상 및 노면상태, 초·단기 예측정보 생산

- 기상정보 표출서비스

· 경기장 주변 기상정보, 지역별 초단기 및 상세예보, 주변 도로 기상상황 및 예측, 선수 및 임원을 위한 기상실황 제공

· 사람이 많이 모이는곳에는 맞춤형인 터치형 기상정보 시스템을 제공

- 개인화 맞춤정보 서비스

· 경기진행, 경기참여, 경기관람, 이동, 관광 등을 위한 맞춤 기상정보 제공

2. 평창 동계올림픽 특화기상지원 기술 개발

- 동계올림픽 기상예보
 - 고해상도 수치모델(1km 격자) 운영체계 구축 : 경기장 주변 고해상도 앙상블 예측 시스템 개발
 - 동계 특별관측 : 평창 중심의 강원 동계 3차원 특별관측 수행
- 경기장 상세 기상정보
 - 임원은 경기 진행판단, 선수는 경기 출전 준비, 관람객은 경기 관람 대비를 위해 시정, 풍속, 기온, 강우, 적설 등의 상세 기상정보를 제공
- 인공증설 등 기상조절 기본·핵심 기술 개발 사업
 - 위험기상 목표관측 및 기상조절 연구용 항공기 도입(2012~2015)



- 국제 협력을 통한 선진 기상지원 기술 도입
 - 2014 소치 동계올림픽 기상지원 국제 협력을 통한 선진기술 도입
 - 2018 평창 동계올림픽 기상지원 국제 공동연구 추진



제3절 모니터링 위치선정 방법론 개발

1. 기후 모니터링 기준 및 기후지수 조사

기후 모니터링과 관련된 법률은 기상관측표준화법(method of meteorological observation)에서 다루고 있으며 2011년 9월 16일 타법개정을 통해 시행되었다. 이에 따르면 내용을 간략히 제시하면, “기상관측의 원칙, 관측에 사용되는 측기 취급법, 관측 순서, 관측값의 정리와 보고 방법 등 관측에 필요한 사항을 간추려서 정리한 지도서로 관측지침이라고도 한다. 기상관측법은 국제적으로 통일된 것이어야 하므로 우리나라에서도 세계기상기구의 지침에 따라 기상청에서 지상기상관측지침, 고층기상관측지침 등을 발행하여 기상관측의 기준으로 하고 있다.”라고만 언급되어 있을 뿐 상세히 규제하고 있지는 않다.

기상관측표준화법과 더불어 기상관측에서는 기상관측표준화를 위한 4대 기준이 존재하는데 그 기준은 ①기상관측장비 규격, ②기상관측 환경, ③기상관측자료의 표준화 및 품질관리, ④기상관측자료의 교환을 위한 통신체계가 있다.

기후 모니터링에 대한 통상적인 기준 조사를 기온, 강수량에 대해 실시하였는데 그 내용은 다음과 같다.

먼저 기온은 대기의 온도를 말하며, 국제적으로는 지면으로부터 1.25~2.0m의 높이에서 측정하는 것을 기준으로 하고 있으나, 우리나라에서는 1.5m 높이를 기준으로 하고 있다.

강수량은 비나 눈, 우박 등과 같이 구름으로부터 땅에 떨어져 내린 강수의 양을 말한다. 어느 기간 동안에 내린 강수가 땅 위를 흘러가거나 스며들지 않고, 땅 표면에 고여 있다는 가정 아래 그 관 물의 깊이를 측정한다. 눈·싸락눈 등 강수가 얼음인 경우에는 이것을 녹인 물의 깊이를 측정한다. 비의 경우에는 우량 또는 강우량이라고도 하며, 단위는 mm로 표시한다.

<표 6.1> 관측센서 형식 및 내용

관측센서	형식	내용	비고
기온	금속시스템	<ul style="list-style-type: none"> ○ 측정범위 : -40 ~ +60℃ (초상, 지면, 지중온도 : -40 ~ +100℃) ○ 정확도 : ±0.3℃ 이내 ○ 운용환경 : -50 ~+50℃ ○ 분해능 : 0.1℃ ○ 기타 : 100Ω의 백금 4선식 	
	박막형	<ul style="list-style-type: none"> ○ 측정범위 : -40 ~ +60℃ ○ 정확도 : ±0.3℃ 이내 ○ 운용환경 : -50 ~+50℃ ○ 분해능 : 0.1℃ ○ 기타 : 100Ω의 백금(유리코팅 또는 보호통) 	
강수량	전도형	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수수구 : 직경 200mm ○ 측정범위 : 1전도(Bucket)당 0.5mm(또는 1.0mm) ○ 정확도 : 20~50m/h 강우강도에서 3% 이내 ○ 재질 : 스테인리스 ○ 운용환경 : 기온 -50~+50℃ ○ 수수구 그물망 : 봉 또는 수평형태의 그물망 ○ 분해능 : 0.5mm 또는 1.0mm 	
	무계식	<ul style="list-style-type: none"> ○ 측정범위 : 1,000mm 이상 (수동배수와 자동배수 처리가능) ○ 정확도 : ±1% ○ 운용환경 : 기온 -50~+50℃ ○ 분해능 : 1.0mm 	

이렇게 관측된 기상자료는 다양한 기준에 의해 공표되는데 이는 구체적 수치에 대한 감각이 적은 일반인에게 기상자료에 대한 경각심을 주기위한 방안으로 동계올림픽 기간 내에도 기후와 관련된 기후지수를 개발하여 공표할 필요가 있을 것이다. <표 6.2>는 대표적 기후지수인 강풍과 대설, 한파에 대한 주의보와 경보 기준을 나타낸 것이다.

<표 6.2> 대표적 기후지수

종류	주의보	경보
강풍	육상에서 풍속 14m/s 이상 또는 순간풍속 20m/s 이상이 예상될 때. 다만, 산지는 풍속 17m/s 이상 또는 순간풍속 25m/s 이상이 예상될 때	육상에서 풍속 21m/s 이상 또는 순간풍속 26m/s 이상이 예상될 때. 다만, 산지는 풍속 24m/s 이상 또는 순간풍속 30m/s 이상이 예상될 때
대설	24시간 신적설이 5cm이상 예상될 때	24시간 신적설이 20cm이상 예상될 때. 다만, 산지는 24시간 신적설이 30cm이상 예상될 때
한파	10월~4월에 아침 최저기온이 전날보다 10℃이상 하강하여 발효기준값 이하로 예상될 때. 다만, 발효기준값은 아침최저기온 평년값에서 1/2표준편차를 감한 값의 정수값	10월~4월에 아침 최저기온이 전날보다 15℃이상 하강하여 발효기준값 이하로 예상될 때. 다만, 발효기준값은 아침최저기온 평년값에서 1/2표준편차를 감한 값의 정수값

2. 모니터링 위치 선정기준 및 방법론

자료조사에 따르면 기후 모니터링 선정기준은 측정항목, 측정기기, 측정목적 등에 따라 다양하며 대부분의 경우를 만족하기 위해서는 다음과 같은 4개의 일반적인 항목을 선정할 수밖에 없다.

1. 관측장소는 70m²이상(최소 35m²)인 지상
2. 지역기상을 대표하는 곳
3. 장애물의 영향이 적은 곳
4. 주변지형이 평탄한 곳

따라서 일반적인 경우를 만족시킬 수 있는 모니터링 위치 선정기준을 마련한다는 것은 불가능해 보인다. 다시 말해 기후 모니터링 목적, 항목, 측정기기가 구체적으로 정해져야 모니터링 선정기준을 제시할 수 있을 것이다.

따라서 본 절에서는 다만 위치 선정을 위한 방법론으로 AHP방법을 제시하였으며, 본 연구에서는 방법론 소개와 AHP 분석을 위한 계층 구조 설계까지만 소개하였다.

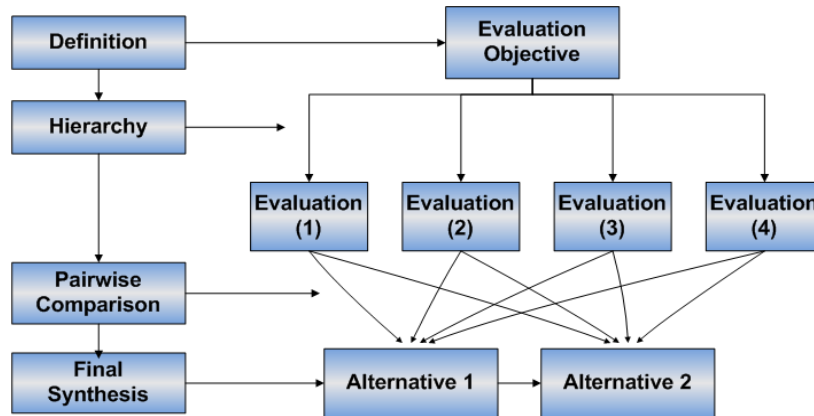
2.1 방법론

모니터링 적지선정을 위한 방법으로 계층분석과정(Analytic Hierarchy Process; AHP)을 활용할 수 있다. AHP방법은 전체의 대안을 한 번에 평가하는 것이 아니라 각 대안들을 분석을 위한 계층구조로 분류한 후 각 대안씩 쌍대비교를 통해 상대적인 중요도를 비교하는 방법으로 Saaty(1980)에 의해 개발되었다.

AHP의 분석을 위해서는 우선 계층도를 작성하고, 쌍대비교와 선호지수를 산정한 다음, 적합성을 평가하는 일련의 순서를 거치게 된다.

AHP기법을 이용하여 문제를 해결하려면 <그림 6.7>과 같이 문제의 정의, 계층적 구조화, 쌍대비교, 최종 종합을 체계적으로 수행하기 위해 평가목표·평가기준·대안을 상호 연관되게 계층구조로 만들어야 한다. 계층도 작성 시에는 제일 상위에 평가의 목표 세우고, 그 아래로 대안을 평가하기 위한 평가기준을 횡으로 나열한 다음, 평가 목표와 선으로 연결한다. 그리고 평가기준의 아래에 대안을 나열하여 평가기준의 각 요소와 선으로 연결한다.

계층구조가 만들어지면 다음으로 쌍대비교와 선호지수 산정이 필요하다. 쌍대비교는 요소 i 와 요소 j 의 비교를 통해서 한쪽이 어느 정도 더 중요한지에 대한 답을 <표 6.3>과 같이 '똑같은(equal), 약간(slight), 꽤(quite), 매우(very), 절대적으로(absolute) 중요하다' 등으로 구별할 수 있다. 쌍대비교를 하는 이유는 각 대안들의 평가기준 선호도를 산정할 때 한꺼번에 전체 비교가 어렵기 때문이다. 두 기준에 대한 중간값을 사용함으로써 좀 더 정확하게 판단할 수도 있다. 각 요소에 대한 쌍대비교 행렬은 <표 6.4>와 같다.



<그림 6.7> AHP 분석과정

<표 6.3> 쌍대비교 값

Relative importance between element i and j	Intensity of importance (a_{ij})
i and j is equally important	1
i is slightly more important than j	3
i is quite more important than j	5
i is very more important than j	7
i is absolutely more important than j	9
Intermediate values between two adjacent judgements	2, 4, 6, 8

<표 6.4> 쌍대비교 행렬 구성

	element 1	element 2	element 3	element 4
element 1	1	a_{12}	a_{13}	a_{14}
element 2	$\frac{1}{a_{12}}$	1	a_{23}	a_{24}
element 3	$\frac{1}{a_{13}}$	$\frac{1}{a_{23}}$	1	a_{34}
element 4	$\frac{1}{a_{14}}$	$\frac{1}{a_{24}}$	$\frac{1}{a_{34}}$	1

선호도 지수를 구하는 방법은 우선, 표 VI-2와 같이 만들어진 쌍대비교 행렬 a_{ij} 에서 각 열(column)에 대한 합 S_i 를 구한다(식 6.1).

$$S_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (6.1)$$

다음, 각 요소값 a_{ij} 들을 열의 합인 S_i 로 나누면 식 5.2와 같이 V_{ij} 인 행렬이 얻어지며, 이를 정규화된 쌍비교 행렬(normalized pairwise comparison matrix) 또는 정규화된 행렬(normalized matrix)이라 부른다.

$$V_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_i} \quad (6.2)$$

이제, 상대적 가중치를 구하기 위해 각 행(row)별로 정규화된 가중평균(normalized weight)을 구하면 식 (6.3)과 같다.

$$P_j = \sum_{i=1}^n \frac{V_{ij}}{n} \quad (6.3)$$

여기서, P_j 는 각 요소의 선호도지수 또는 상대적 중요도(Relative Importance Weight, RIW)라 하고, P_j 값들을 모두 더하면 '1'이 되어야 한다.

선호도 지수를 계산하려면 일련의 쌍대비교에 일관성이 있어야 한다. 즉, 주어진 요소값에 대하여 논리적 일관성이 있는가를 조사하기 위해 일관성비율(Consistency Ratio, CR)을 평가해야 한다. Satty(1980)에 의하면 CI은 일관성지수(Consistency Index, CI)를 무작위지수(Random Index, RI)로 나눔으로써 계산되며 식 (6.4)와 같다.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6.4)$$

여기서, CI는 행렬의 최대고유치 λ_{\max} 와 행렬의 크기 n 으로부터 얻어지는 것으로 식 (6.5)로 나타낼 수 있다.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6.5)$$

또한 RI는 1에서 9까지 정수들을 무작위로 추출하여 상반행렬을 작성한 후 일치지수를 구한 것으로, N×N 쌍대비교행렬의 무작위 지수 값은 <표 6.5>에 나타냈다. 기준에 대한 의사결정자의 판단은 일관성 비율이 10% 이하일 경우에는 양호한 결과이며, 기준에 대한 우선순위 평가는 신뢰성이 매우 높다고 볼 수 있다.

〈표 6.5〉 N×N 쌍대비교행렬에서 무작위지수

N	2	3	4	5	6	7	8
<i>RI</i>	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

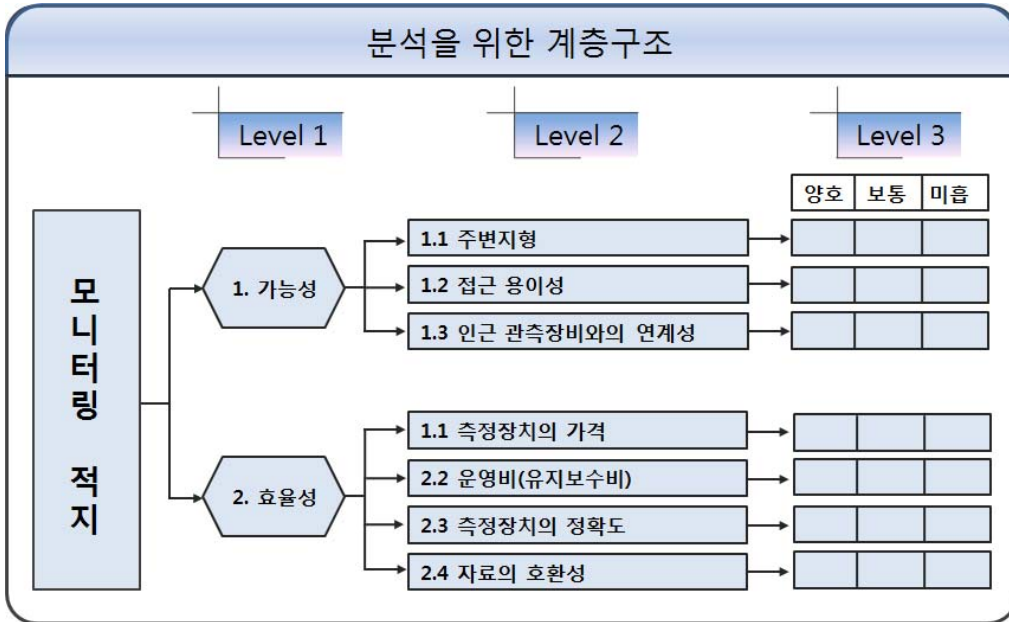
최종적으로 우선순위를 결정하기 위해 적합도(Suitability Index, SI)는 각 단계별 상대적 중요도(RIW_i)를 이용하여 식 (5.6)과 같이 표현된다. 적합도가 높을수록 좀 더 나은 대안이 됨을 의미한다.

$$SI = \sum_{i=1}^n RIW_i \quad (6.6)$$

여기서, RIW_i 는 i 번째 요소(element)에 대해 계산된 최상위부터 최하위 유효레벨까지의 상대적중요도의 누적값이다(이상일과 이상신, 2008).

2.2 분석을 위한 계층구조화

분석을 위한 계층구조를 설계하기 위해서는 기준을 확립하고 AHP 기법에 의한 분석의 틀을 만드는 것이 필요하다. 계층구조 정립을 위해서는 전문가 설문이 필수적이다. 본 연구에서 분석을 위한 계층구조는 모니터링 적지를 하나의 지표로 묶고 첫 번째 계층은 가능성과 효율성으로 구성하였으며, 두 번째 계층에는 가능성과 효율성을 3-4개로 구분하여 계층을 구성하였다(그림 6.8).



<그림 6.8> 분석을 위한 계층구조

제 7 장

결론 및 정책제언

제 1 절 결론

제 2 절 정책제언

제 7 장

결론 및 정책제언



제1절 결론

2018평창동계올림픽 개최에 영향을 끼칠 것으로 예상되는 기후변화 전망에 중점을 두고 올림픽 계획 수립에 있어 고려되어야하는 기후변화 시나리오 결과 분석 및 올림픽 환경계획과 기후모델링 및 기후 모니터링과 관련된 연구를 진행함으로써 강원도와 2108평창동계올림픽 조직위원회의 올림픽관련 정책 특히 환경계획과 관련한 기초자료를 제공하기 위해 본 연구를 수행하였다.

본 연구에서 도출된 결과 및 성과는 다음과 같다.

- 우리나라와 강원도의 기후현황 분석
- 개최지 주변(평창, 강릉) 기후현황 분석
 - 평창, 강릉지역 기상대(2개)와 AWS(11개)지점에 대한 과거 30년간 자료 분석
 - 기온 : 평균기온, 최고기온, 최저기온이 1980년대 대비 2000년대 약 1℃ 상승
 - 강수량 : 1980년대에 비해 1990년대 17% 증가
 - 올림픽 개최기간인 2월과 장애인 올림픽 개최기간인 3월 기후 분석
 - 2월 평균 기상 : 1980년 대비 최고 2℃ 증가하지만 최고기온은 1℃ 이하유지

3월 평균 기상 : 최고기온의 증가(1.5℃)가 두드러짐(평균기온 0.5℃ 증가)

- 계절 길이 분석결과 평창의 경우 겨울이 9일 줄고 여름은 16일 증가
- 올림픽 기간인 2월과 3월의 추운 날과 따뜻한 날 증가 추세

올림픽 경기 운영에 큰 리스크로 작용할 가능성 존재

- 개최지 주변 시민 대상 기후변화 인식 조사
 - 평창군, 강릉시 일반 시민 대상 설문 실시
 - 기후변화에 인식은 높게 나타나고 있으나 관련 정보에 대한 노출도 낮음
 - 환경올림픽보다 경제올림픽을 더 중요하게 고려
 - 개최지 주변 시민들에 대한 교육 홍보의 필요성 인지
- RCP 기후변화 시나리오에 따른 개최지 주변 기후변화 전망
 - 올림픽 개최시기 전후 최대 1℃ 온도상승 전망
 - 3월의 경우 경기운영에 영향을 미칠 것으로 예측 가능
- 동계올림픽 환경계획 조사
 - 최근 3개의 동계올림픽 운영에 대해 기후변화 대응사업 조사
 - 2018평창동계올림픽 특별보고서 조사
- 개최지 주변 기후 모델링
 - WRF 모델을 이용한 강릉지역 기후모델링 실시
 - 토지이용 변화에 의한 온도상승 확인
 - 향후 올림픽 계획 수립 후 기후모델링 필요성 인식
- 기후모니터링 방법 및 모니터링 적지 선정 방법론 제시
 - 기후모니터링 방법 및 장비 조사·분석
 - 기후관련 동계올림픽 지원 계획 조사
 - 모니터링 위치 선정기준 및 AHP 분석을 활용한 방법론 제시




제2절 정책제언

- 개최지 주변 지역민에 대한 환경올림픽 계획 홍보 및 교육 필요
설문조사 결과 응답자의 62.8%가 대졸로 고학력의 구성원이었으나 기후변화나 환경관련 교육에 대해서는 55.5%가 접하지 못함에 따라 관련 정보에 대한 노출 빈도를 높이게 되면 그 성과는 클 것으로 예상된다. 따라서 관련 교육·홍보 계획을 수립하여 지역민들의 환경올림픽에 대한 의식수준 향상이 필요하다.
- 기후지수 개발 공표 및 올림픽 기간 혹한이나 이상고온 대비 행동매뉴얼 작성
올림픽 개최 이전에 우리 실정에 맞는 올림픽 운영을 위한 기후지수를 개발하고 공표함으로써 올림픽 개최당시 선수를 비롯한 참석자들의 기상 현상에 대한 대응 경각심을 유발하여 성공적인 대회 운영에 도움이 될 것이다. 또한 이와 더불어 이상기온시 행동매뉴얼을 작성하고 훈련이 필요하다.
- 2018평창동계올림픽 조직위원회 차원의 모니터링 노력 경주
현재 개최지 주변 기후 모니터링은 기상청, 산림청 등이 주체가 되어 기존의 방법과 매뉴얼에 따라 자료를 축적하고 있다. 따라서 올림픽 운영에 도움이 될 수 있는 자료 축적을 위해서는 조직위가 중심이 되는 모니터링 노력이 필요하다.
- 올림픽을 위한 효율적 기후변화대응 역할 분담
기후변화에도 불구하고 올림픽의 성공적 개최를 위해서는 이해관련기관들의 긴밀한 협조가 필요한데 비해 현재 올림픽의 기후변화대응 업무가 집중되지 못하는 실정이다. 따라서 국가, 조직위, 강원도 등 관련기관들의 기후변화 대응 업무에 대한 역할분담 논의가 필요해 보인다.

◦ 기후변화 위험도 작성

강원도의 관점에서는 기후변화에 대한 위험(취약)지구 선정 및 운영 방안을 마련하여 기상재해에 대한 대비가 요구된다. 특히 기후변화와 관련된 위험지도를 시스템으로 구축하여 운영할 인력과 자원마련이 시급하다.

**미래에 대한 정확한 예측은 질 좋은 자료 구축으로 부터 가능하며,
질 좋은 자료를 구축하기 위해서는 완벽한 모니터링이 필요하다.**


참고문헌

- Benestad R. E., Inger H. B., Chen D. (2008). Empirical-Statistical Downscaling, World Scientific
- Benestad R. E., Inger H. B., Chen D. (2008). Empirical-Statistical Downscaling, World Scientific
- DAI Portal, <http://loki.qc.ec.gc.ca/DAI>
- Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. J. Atmos. Sci., 46, pp.3077-3107.
- Hong, S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen (2004). A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. Mon. Wea. Rev., 132, pp.103-120.
- <http://www.climate.go.kr> 2012.08.01.
- IPCC (2007). Climate change 2007, synthesis report
- Jimmy Dudhia, Dave Gill (2000). PSU/NCAR Mesoscale Modeling System tutorial class notes and user's guide : MM5 Modeling System version 3.
- Lee, D.-K., and S.-J. Choi (2010). Observation and numerical prediction of torrential rainfall over Korea caused by Typhoon Rusa (2002) . J. Geophys. Res., 115, D12105, doi:10.1029/2009JD012581.
- Lim, K.-S., and S.-Y. Hong (2007). Numerical simulation of heavy snowfall over the Ho-Nam province of Korea in December 2005. J. Korean Meteor. Soc., 43, pp.161-173.

- Saaty T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process, McGraw Hill International.
- Shin, H.-Y., and S.-Y. Hong (2009). Quantitative precipitation forecast experiments of heavy rainfall over Jeju island on 14-16 September 2007 using the WRF model. Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 45(1), pp.71-89.
- Wilby R. L. and Dawson C. W. (2007). SDSM 4.2 - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts - User manual
- 국립기상연구소(2009). 기후변화 이해하기Ⅱ - 한반도 기후변화 : 현재와 미래
- 기상청(2012). 2012 국가 기후변화 시나리오 Workshop
- 농촌진흥청(2011). 기후변화대응 녹색농업기술 보고대회 '기후변화시대! 우리 농업의 현재와 미래'
- 방기석, 류성현, 이평근(2005). 신개념 통합 기상관측장비인 VAISALA WXT510 특징, 2005년도 한국기상학회 가을 학술대회 논문집
- 변의용, 홍성유, 신혜음, 이지우, 송재익, 함숙정, 김좌겸, 김형우, 김종석(2011). WRF 기반 공군 단기 수치예보시스템, 한국기상학회지 Vol. 21, No.2(2011) pp.197-208
- 성현민, 이재규(2011). 등지격자기법에 따른 영동해안지역 대설사례에 대한 WRF 수치모의 및 검증
- 염준근(2005). 선형회귀분석, 자유아카데미
- 이상일, 이상신(2008). 한가에서의 강변여과수 개발을 위한 적지선정 및 개발가능량 산정(1), 한국수자원학회논문집, Vol.4 No.8, pp.825-834
- 장윤정(2010). 관측과 기상모델을 이용한 춘천지역의 도시열섬현상 연구, 강원대학교 석사학위 논문

- 전성우, 정휘철, 이동근, Yuzuru Matsuoka, Hideo Harasawa, Kiyoshi Takahashi (2004). 기후변화영향평가 모형 개발 - 물관리 부문을 중심으로
- 최광용, 권원태, David A. Robinson (2006). 우리나라 사계절 개시일과 지속기간, 대한지리학회지, 제41권 제4호. pp.435-456
- 한국경제(2011.7.7.) [평창2018동계올림픽 유치] 경제효과 20조원, 23만명 고용 창출. 2002년 월드컵의 2배
- 한국기후변화대응연구센터(2012). 2018평창동계올림픽의 온실가스 배출량 전망 및 배출권거래제 활용방안
- 홍성유, 이지우(2006). WRF 모형을 이용한 한반도 집중호우에 대한 지형 효과의 수치모의 연구
- 환경부(2011). 기후변화에 따른 우리나라 피해비용 보도자료



연구책임 | 이상신 한국기후변화대응연구센터 책임연구원

공동연구 | 최진용 한국기후변화대응연구센터 연구원
권혁기 한국기후변화대응연구센터 연구원

정책연구 2012-002
동계올림픽 개최지 주변 기후변화 영향 예측
및 모니터링 계획 수립

* 인 쇄 _ 2012년 12월
* 발 행 _ 2012년 12월
* 발 행 인 _ 홍성태
* 발 행 처 _ 한국기후변화대응연구센터
* 주 소 _ (200-041) 강원도 춘천시 중앙로 5
* 홈페이지 _ www.crik.re.kr

ISBN _ 798-89-97562-138 93530