발간등록번호
11-1360620-000141-10

기상업무지원기술개발연구

Research and Development for KMA Weather, Climate, and Earth system Services

기상정보활용 및 가치창출 지원 연구

Support to Use of Meteorological Information and Value Creation

2019

미래전략연구팀

기상청

국 립 기 상 과 학 원

National Institute of Meteorological Sciences

Korea Meteorological Administration

국립기상과학원

책임운영기관

연구 보고서

1. 제목: 기상정보활용 및 가치창출 지원 연구

Support to Use of Meteorological Information and Value Creation

2. 연구부서: 국립기상과학원 미래전략연구팀

3. 연구기간: 2019. 1. 1. - 2019. 12. 31.

4. 연구책임자: 이 희 춘

5. 참여연구원:

김승범[1] 이희춘[2] 김환승[3] 양정현 손숙경[3]
이대근 양수미 방소헌 이윤정[3] 김인겸
이승욱 김혜민 김형미[4]

[1]참여기간: 2019. 1. - 2019. 1.
[2]참여기간: 2019. 1. - 현재
[3]참여기간: 2019. 7. - 현재
[4]참여기간: 2019. 5. - 현재

목 차

목차 ····· i
표 목차 ····· iv
그림 목차 ····· v
국문 요약문 ····· vii
영문 요약문 ····· xi

제 1 장 서론 ····· 1

제 2 장 기상기술·정책 정보 동향 조사·분석 및 개발 ····· 3
제 1 절 기상기술·정책 정보 동향 ····· 3
1. 자료 및 조사 현황 ····· 3
(1) 조사기간 및 출처 ····· 3
(2) 조사 현황 ····· 4
2. 분야별 주요 내용 ····· 6
(1) 기상기술·정책 전략 ····· 6
(2) 기후 ····· 7
(3) 해양 ····· 8
(4) 환경기상 ····· 10
(5) 위험기상/재해 ····· 11
(6) 관측/장비 ····· 12
(7) 응용기상 ····· 13

제 3 장 다학제 융합기반 기술 연구 ····· 16
제 1 절 한파에 따른 질환별 사망률 분석 ····· 16
1. 연구배경 ····· 16
2. 연구자료 및 방법 ····· 17

3. 결과 및 고찰 ····· 19
제 2 절 여름철 야외 노동자의 적정 휴식시간 분석 ····· 22
1. 연구방법 ····· 22
(1) 종관기상관측시스템 자료 ····· 22
(2) WBGT지수 산출 ····· 24
(3) 온열질환 응급실감시체계 자료 ····· 24
(4) WBGT지수에 따른 온열질환자 발생 추이 ····· 25
(5) 여름철 야외 노동자의 적정 휴식시간 산출 ····· 25
2. 결과 및 분석 ····· 26
(1) 우리나라 주간 WBGT지수의 특성 ····· 26
(2) WBGT지수와 온열질환자 발생과의 관련성 ····· 28
(3) WBGT지수에 따른 야외 노동자의 적정 휴식시간 ····· 29

제 4 장 정책전략 개발 및 기획 연구 ····· 31
제 1 절 폭염특보 정보의 경제적 가치 평가 ····· 31
1. 연구방법 ····· 31
(1) 의사결정모델 ····· 31
(2) 예보 정보의 경제적 가치 평가 ····· 32
(3) 연구자료 ····· 34
2. 결과 및 분석 ····· 37
제 2 절 국립기상과학원 연구개발의 경제적 가치 추정 ····· 39
1. 평가대상 ····· 39
(1) 기상항공기 ····· 40
(2) 모바일기상관측차량 ····· 40
(3) 황사·연무통합예측모델 ····· 40
(4) 지역파랑예측모델 ····· 41
(5) 기후예측모델 ····· 41
2. 선행연구 ····· 42
3. 방법론 ····· 43

(1) 속성 및 수준 ····· 44
(2) 선택대안집합의 설계 ····· 45
(3) 표본설계 및 설문 ····· 46
4. 추정모형 ····· 47
5. 분석결과 ····· 48
(1) 추정결과 ····· 48
(2) 모형검정 ····· 50
(3) 속성별 한계지불의사액 ····· 50

제 5 장 요약 및 결론 ····· 52

참고 문헌 ····· 56

List of Table

Table 3.1.1. Mean meteorology characteristics of sub-divided cold spell in this study (1991-2015). To characterize more cold-stressful days, DP subsets, DP+ and DP++ were suggested ····· 20
Table 3.2.1. Geographical information of Automated Synoptic Observing System used in calculation WBGT ····· 23
Table 3.2.2. Permissible heat exposure threshold limit value (WBGT, ℃) (KOSHA, 2017) ····· 26
Table 3.2.3. Average rest time for outdoor worker according to the work load and summer sub-period (Jun.-Aug.) ····· 30
Table 4.1.1. 2×2 contingency table for valuation of weather forecast ····· 32
Table 4.1.2. 2×2 contingency table for heat wave warning during summer in 2016 ····· 35
Table 4.1.3. Medical expenses of heat related diseases (unit: 10,000 KRW) ····· 37
Table 4.1.4. Economic value of heat wave warning in 2016 (unit: KRW) ····· 38
Table 4.2.1. Attributes and levels of improvement of observation systems use and prediction model accuracy ····· 45
Table 4.2.2. Estimation results of the nested logit model ····· 49
Table 4.2.3. Estimation results of MWTP ····· 51

List of Figure

Fig. 2.1.1. Total number of collected monthly information in 2019. ····· 3
Fig. 2.1.2. Total number of sources which collected information monthly. ····· 3
Fig. 2.1.3. The portion of sectoral field. ····· 4
Fig. 2.1.4. The portion of international field. ····· 5
Fig. 2.1.5. The portion of the source of information. ····· 5
Fig. 3.1.1. The 25yr (1991-2015) climatological relationship of seasonal cycles between all caused mortality and daily minimum temperature in Seoul, Korea. ···· 18
Fig. 3.1.2. DP++ effects on averaged cause-specific excess mortality 6 metropolitan cities in Korea during winter DJF period (1991-2015). Error bar indicates 95% confidence interval. ····· 21
Fig. 3.2.1. Boxplot of daytime (06:00-18:00) WBGT in summer. ····· 27
Fig. 3.2.2. Trend of average WBGT and number of days with WBGT above 26.7℃ (Jun.-Aug.). ····· 28
Fig. 3.2.3. Change of heat-related illness responded to daytime WBGT with the predicted frequencies from the Poisson regression (2012-2018). ····· 29
Fig. 4.1.1. Decision paths implemented in the model. ····· 32
Fig. 4.1.2. Changes in number of health insurance claims in 2016. ····· 36
Fig. 4.1.3. Monthly medical expenses from T67 disease in 2016 (unit: KRW). ·· 37
Fig. 4.2.1. An example of a set of alternatives. ····· 46

요약문

Ⅰ. 제목

기상정보활용 및 가치창출 지원 연구(Ⅶ)

Ⅱ. 연구의 필요성

- 기후변화로 인해 빈도와 강도가 증가하여 발생하고 있는 위험기상의 예측과 이로 인한 인적·물적 피해 최소화를 위해 각 선진국에서 수행중인 기후변화 및 위험기상의 예측, 서비스 제공 등과 관련한 선진 사례와 동향의 조사·분석 필요
- 기상청의 체계적 정책전략 개발을 위해 한파에 따른 대도시 질환별 초과사망률 분석, 여름철 야외 노동자 열 스트레스 분석, 폭염특보 정보의 경제적 가치 분석, 관측장비 활용 증진 및 모델 예측정확도 개선의 경제적 가치 평가를 통한 다학제 융합기술 개발과 정책전략 개발 필요

Ⅲ. 연구개발 목표

- 기상기술·정책 정보 동향 조사·분석 및 개발
- 다학제 융합기반 기술 연구
  · 겨울철 한파에 따른 6대도시 질환별 초과사망률 분석(1991-2015)
  · 여름철 야외 노동자의 열 스트레스 현황과 적정 휴식시간 분석
- 정책전략 개발 및 기획 연구
  · 폭염특보 정보의 경제적 가치 평가
  · 관측장비 활용 및 예측모델 정확도 개선의 경제적 가치 추정

Ⅳ. 연구 내용 및 결과

1. 기상기술·정책 정보 동향 조사·분석 및 개발

2019년 1월부터 12월까지 총 206건의 기상기술·정책 동향 정보를 조사·분석하였다. 월 평균 17건의 정보가 조사되었으며, 조사된 정보 내용에 따라 '정책'과 '기술' 분야로 분류시 각각 67건(33%)과 137건(67%)으로 나타났다. 자료출처는 외국 기상청, 연구기관, 국제 학술지, 뉴스, 국제기구, 외국 정부기관 등의 웹사이트이며, 내용에 따라 '기상기술·정책 전략', '기후', '해양', '환경기상', '위험기상/재해', '관측/장비', '응용기상'으로 분류하였다. 결과, 기후변화 및 기상재해 대응 등 정책 관련 '기상기술·정책 전략' 분야는 69건(34%), 기후변화 예측 및 적응·완화 관련 '기후' 분야는 44건(21%)으로 두 분야의 정보가 절반 이상을 차지했다. 또한 기상재해 대응 및 피해 완화 관련 '위험기상/재해' 분야는 29건(14%), 도시기상, 농업기상 등 '응용기상' 분야는 28건(14%)으로 나타났다. 그 밖에 해수면온도, 극지방, 해양 순환 등과 관련된 '해양' 분야는 총 10건(5%), 황사·연무, 온실기체 예측과 관련된 '환경기상' 분야는 7건(3%)을 차지했다.

2. 다학제 융합기반 기술 연구

가. 한파에 따른 질환별 사망률 분석

1991-2015년 기간 내 겨울철을 대상으로 우리나라 6대도시(서울, 대전, 대구, 부산, 광주, 인천)에서 질환별 일 초과사망률에 대한 한파의 건강영향을 분석하였다. 분석에 사용된 날씨유형분류(Spatial Synoptic Classification)는 각 지역별 기상요소를 활용해 날씨유형을 분류하는 데 적용되었다. 특히 DP (Dry Polar) 날씨 유형은 한반도의 전형적인 겨울 기후를 효과적으로 나타내었으며, 겨울철 대륙성 고기압의 장출에 따른 가장 높은 빈도를 나타내었다. 분석을 위해 표준화된 한파 초과사망률은 각 도시별로 달랐는데 더 낮은 온도와 강한 북서풍으로 특징지어진 DP의 하위집합일(DP+ DP++) 동안 모든 지역에서 가장 높았다. 서울에서 DP++의 일최저기온은 -11.9℃로 나타났다. DP++인 날에 6대도시의 초과사망률은 급격한 동시 증가를 보였는데, 이는 기온 하강에 따른 한파의 강도, 한파 내습 후 지연시간, 그리고 고연령 및 만성질환별 건강 취약성을 제시한 것으로 판단된다. 특히, DP++ 6일 후, 모든 질병사망률(13%)의 피크가 관찰되었고, 심혈관질환 고령자 사망률 피크(10.0%)도 관찰되었다. 호흡기질환 고령자 사망률 피크 (12%)도 6일 째에 관측되었다. 본 분석결과는 만성질환이 있는 사람에 대한 한파

건강영향의 심각성을 나타낸다. 또한 날씨유형 분류 방법론이 한국 대도시 일사망률에 대한 한파 스트레스 영향의 정량화 및 일별 예측시스템에 활용가능함을 보여준다.

나. 여름철 야외 노동자의 적정 휴식시간 분석

우리나라 여름철 열스트레스 현황에 따른 야외 노동자의 적정 휴식시간을 분석하였다. 이를 위해 27개 종관관측지점의 자료를 사용해 습구흑구온도(이하, WBGT)지수를 산출하고, WBGT지수 임계치와 노동강도에 따라 권장되는 작업-휴식 시간비를 활용하여 정량적 휴식시간을 산출하였다. 그 결과, 가장 더운 시간대인 11:00-15:00에 중작업을 수행하는 노동자의 신체에 열스트레스가 가해질 것으로 분석되었다. 특히, 최근 지속되는 온난화로 인해 2018년과 같은 해에는 중등작업을 수행하는 노동자들 역시 야외 작업시간의 약 42%에 달하는 시간동안 열스트레스를 겪을 수 있는 것으로 나타났다. 여름철에 요구되는 평균 휴식시간은 중등작업과 중작업에서 각각 5분, 11분 수준이었으며, 장마가 지난 여름철 성하기에는 각각 12분, 21분까지 증가하였다. 고열환경에서 야외 노동자의 열스트레스로 인한 온열질환 예방을 위해 정량적인 작업-휴식시간 규정 마련 및 적극적인 준수가 필요하다.

3. 정책전략 개발 및 기획 연구

가. 폭염특보 정보의 경제적 가치 평가

본 연구는 여름철 폭염특보 정보의 경제적 가치 평가를 목적으로 수행되었다. 폭염특보 정보의 경제적 가치를 평가하기 위해 비용-손실을 고려한 의사결정모델이 수립되었다. 폭염대책 행동에 소요되는 비용은 서울시와 자치구에서 2016년 사용한 총 폭염 관련 예산을 고정비와 변동비로 구분하여 수집하였다. 폭염으로 인한 손실 추정을 위해 건강보험심사평가원이 제공하는 65세 이상 고령자의 건강보험 청구자료를 수집하여 폭염 관련 질환의 월별 건강보험 청구금액을 도출하였다. 비용-손실 분석 결과 기상청 폭염특보는 2016년 여름 동안 서울시에 4,133,225,870원의 경제적 가치를 제공하였고, 이는 서울시 폭염 예산의 47.73%에 달한 것으로 나타났다. 그리고 폭염특보의 정확도가 1% 향상되면 서울시는 매일 832,880원의 추가적인 이익을 기대할 수 있다. 100% 정확한 예보의 가치는 5,210,500,040원으로 평가되었다. 연구결과는 향후 피해가 더욱 심해질 것으로 예상되는 폭염의 피해예방을 위한 의사결정 과정에 기상서비스가 투입정보로서 중요함

을 정량적으로 보여준데 의의가 있다.

나. 국립기상과학원 연구개발의 경제적 가치 추정

전 세계적인 위험기상 현상의 피해저감을 위해 신속하고 정확한 관측·예측이 필요하며, 이를 위해 여러 국가에서는 관측장비 개발·활용 개선, 예측모델 개발연구를 진행중이다. 국립기상과학원에서는 기상청 예보서비스 개선을 위한 다양한 연구를 진행중이며, 본 연구에서는 기상 관측장비 활용 및 모델 예측정확도 개선의 편익을 추정하고자 한다. 분석에 활용된 관측장비는 기상항공기와 기상관측차량, 예측모델은 황사·연무통합예측모델, 지역파랑예측모델, 기후예측모델을 속성으로 하며, 편익 추정을 위해 전국 1,000가구를 대상으로 면접설문을 진행하였다. 수집된 자료는 중첩로짓모형을 적용하여 분석하였으며, 개별 속성에 대한 연간 가구당 한계지불의사액을 추정한 결과 모두 유의수준 5%에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 장비 활용 및 예측정확도 개선의 속성별 한계지불의사액은 기상항공기 활용시간 1시간 개선, 재해발생시 기상관측차량 활용률 1%p 개선, 황사·연무통합예측모델 예측정확도 1%p 개선, 지역 파랑예측모델 예측정확도 1%p 개선, 기후예측모델 예측정확도 1%p 개선에 대하여 각각 34원, 31원, 48원, 18원, 17원으로 추정되었다. 본 연구에서 분석된 개별 속성에 대한 국민적 선호와 국가적 시급성은 차이가 있을 수 있음에도 불구하고, 사업의 추진계획 및 관련 정책 수립시 유용한 자료로 활용될 수 있다.

Ⅴ. 기대 효과 및 활용 방안

「기상정보활용 및 가치창출 지원 연구」를 통해 기상·기후서비스 고도화 및 관련 첨단 기술의 사업화를 위한 국가 기상산업시장 확대 및 미래 기상업무 추진방향 설정을 위한 정책수립 지원의 근거자료를 제공할 수 있다. 또한, 다양한 학문 분야와의 융·복합연구를 통해 기상·기후정보의 가치를 높이고 성과를 확산하는 데 기여할 것으로 판단된다.

Summary

Ⅰ. Title

Support to use of meteorological information and value creation (Ⅶ)

Ⅱ. Background

- To minimize the impact of extreme weather events affecting human and infrastructures which happens more frequently and stronger caused by climate change, it is necessary to investigate and analyze advanced case and trends in prediction and detection of climate change, weather phenomena, and meteorological services
- To develop the systematic policy strategy of the KMA, it is necessary to study the technology development based on interdisciplinary convergence such as examination of the effects of cold spells on cause-related daily excess mortality in 6 Korean metropolitan cities during 1991-2015, analysis of heat stress and rest time of outdoor workers in summer, estimation of the economic value of heat wave warning information, and measuring the economic value of improving observation systems use and prediction model accuracy.

Ⅲ. Objectives

- To analyze and develop a meteorological technology and policy
- To develop an interdisciplinary convergence technology
  · To examine the effects of cold spells on cause-related daily excess mortality
  · To analyze rest time of outdoor workers in summer
- To develop and plan a policy strategy
  · Estimating the economic value of heat wave warning information
  · Measuring the economic value of R&D program of NIMS

IV. Research contents and results

1. Trends analysis and development of meteorological technology and policy

From January to December of 2019, meteorological technology and policy information corresponding to 206 articles and papers. 17 articles were collected and analyzed monthly average. 67 articles of policy part (33%) and 137 articles of technology part (67%) were collected, totally. The information were gathered from the various web sites such as foreign meteorological agencies, research institutes, international journals, internet news, international organizations, and foreign government agencies. Every information was classified into seven fields ('meteorological technology·policy strategy', 'climate', 'ocean', 'environmental meteorology', 'observation/equipment', 'high impact weather events/disasters', and 'applied meteorology') depending on the content. As a result, 69 (34%) articles of 'meteorological technology·policy strategy' part and 44 articles of 44 (21%) articles of 'climate' parts took more than a half portion of the total information. Also 29 (14%) articles of 'high impact weather events/disaster' and 28 (14%) articles of 'applied meteorology' were collected. Additionally, 10(5%) articles of 'ocean' part and 7 (3%) articles of 'environmental meteorology' part were analyzed.

2. Research on technology development based on interdisciplinary convergence

a. Cold spell effects on cause - related daily mortality

To utilize the weather type classification scheme, Dry Polar (DP) weather type effectively represented the typical winter climate of Korean peninsula, showing the highest frequency which influenced by Siberian continental high expansion. Estimated standardized excess mortality was varied by each location, and showed the highest during colder DP subset days (DP+ and DP++), characterized by lower temperatures and strong north-western winds. In Seoul, the daily minimum temperature on DP++ days was -11.9℃. For 6 cities, estimated excess mortality on DP++ days showed larger spikes indicating a partial contribution of temperature extremes intensity, lag time, age, and chronic causes. Especially, six day after

DP++, the peak of all-disease mortality (13.8%, 95%CI: 7.0) was observed, and cardiovascular elderly mortality peak (10.0%, 95%CI: 6.7) was observed on the 6th day with a linear increase, and the highest respiratory elderly mortality peak (11.8%, 95%CI: 7.3) was observed on the 6th day. These results reveal the severity of extreme cold spells, especially for individuals with chronic circulatory disease. These results demonstrate that SSC is a suitable methodology for quantifying the effects of cold stresses on daily mortality in Korean metropolitan cities.

b. Analysis of rest time of outdoor worker in summer

We figured out the minimum rest time for the safety of South Korean outdoor workers in summer. To quantitatively calculate the minimum rest time, the WBGT index estimated by 27 weather stations and the work-rest schedule of KOSHA were used. The average of hourly WBGT from 2009 to 2018 showed that outdoor workers with heavy workload are exposed to heat stress, i.e., exceeded the WBGT of 25℃, of their daytime working hours in summer months from June to August. The minimum rest time required for each hour was 5 minutes for moderate work. But in the mid-summer period from late July to early August, the daily minimum rest time for moderate workload noticeably increases to 12 minutes of mid-day (11:00-15:00). To prevent the heat-related illnesses of outdoor workers caused by heat stress in hot environments, it is necessary to prepare quantitative work-rest regimens and to actively follow them.

3. Research on policy strategy development and planning

a. Economic value of heat wave warning information

This study was conducted for the purpose of evaluating the economic value of heat wave advisory and warning (HWAW) in summer. A cost-loss decision model was established to assess the economic value of HWAW. The total heat wave related budget used in 2016 by the Seoul Metropolitan Government and autonomous regions was collected separately from fixed and variable costs. To estimate the

loss caused by the heat wave, the health insurance claim data provided by the Health Insurance Review & Assessment Service were collected to derive the monthly health insurance claim amount for heat-related diseases. The results presented that the KMA's HWAW provided the city with an economic value of 4,133,225,870 KRW during the summer of 2016, or 47.73% of the city's heat wave budget. And if the accuracy of HWAW is improved by 1 %, the city can expect an additional value of 832,880 KRW per day. The perfectly accurate forecast was valued at 5,210,040 KRW. This study is meaningful in quantitatively showing that weather services have sufficient value as the main input information in the decision-making process of heat-prevention measures that are expected to be more damaging in the future.

b. Measuring the economic value of R&D program of NIMS

Extreme weather events which have been changed scale, period, and frequency due to climate change is causing unexpected damage globally. Prompt and accurate forecasting is required to mitigate damage, and so many foreign countries are researching improve observation systems development & uses, and prediction model development. National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) part of Korea Meteorological Administration (KMA) is progressing research of improving several forecasting services which KMA is providing. This study tried to estimate non-market benefits of main studies of NIMS which is making uses of observation systems and accuracy of prediction model better.

A survey of 1,000 randomly selected households was undertaken in Korea to investigate benefit of 5 attributes such as NIMS Atmospheric Research Aircraft (NARA), Mobile Observation VEhicle (MOVE), Asian Dust Aerosol Model version 3 (ADAM3), Regional ocean wave prediction system, Global Seasonal Forecasting Model (GloSea5). The study employs a nested logit model and the results reveal that the marginal willingness to pay (MWTP) for each attributes are significant at the 5% level. Estimated MWTP results of 1 hour extention of NARA uses, 1%p

increasing of MOVE uses, 1%p improvement of three different prediction model which are ADAM3, Regional ocean wave prediction model, and GloSEA5 are KRW 34, 31, 48, 18, 17 per household pre year, respectively. Information from this study will be useful in planning and policy making.

V. Conclusion remarks

By conducting 「A study on support to use of meteorological information and value creation」, it is possible to increase the meteorological market size and to provide fundamental data on establishing the appropriate strategy. Furthermore, multidisciplinary studies could improve the value of meteorological and climate data.

제 1 장 서론

기후변화로 인한 위험기상 현상의 빈도와 강도가 증가하여 전 세계적인 인명·재산 피해를 야기하고 있다. 이로 인한 국민 및 사회기반시설 등의 피해를 최소화하기 위해 첨단 과학기술을 활용한 위험기상 예측정확도 향상뿐만 아니라 서비스 제공수단의 다양화 및 내용 개선 등의 노력이 필요하다. 「기상정보활용 및 가치창출 지원 연구」는 사용자 관점에서의 효율적인 기상정보의 활용과 가치창출 지원을 목표로 한다. 이를 위해 2019년도에는 기상기술·정책 정보 동향 조사·분석 및 개발, 다학제 융합기반 기술 연구, 정책전략 개발 및 기획 연구를 수행하였다.

첫째, 관련부서 및 의사결정자들의 정책개발을 지원하기 위하여 외국의 정부기관, 기상 관련 연구기관, 기상청, 대학 등 관련 기관에서 발표하는 연구결과 및 성과, 전략, 정책 방향과 관련한 정보의 주기적 조사·분석을 수행하였다. 2019년 1월부터 12월까지 기상기술·정책 정보 동향은 총 206건이 수집·분석 되었고, 조사된 정보는 기상기술·정책 전략 분야, 기후 분야, 관측/장비 분야, 해양 분야, 환경기상 분야, 위험기상/재해 분야, 응용기상 분야로 구분하여 분석·제시하였다. 격주로 분석·정리된 정보는 기상청 직원들을 대상으로 한 내부 문서 형태 및 홈페이지를 통한 대국민 공개 형태로 제공하고 있다.

둘째, 다학제 융합기반 기술 연구에는 겨울철 한파에 따른 6대도시 질환별 초과사망률 분석(1991-2015), 여름철 야외 노동자의 열스트레스 현황과 적정 휴식시간 분석 연구가 수행되었다. 1991-2015년 기간 내 겨울철을 대상으로 우리나라 6대도시(서울, 대전, 대구, 부산, 광주, 인천)에서 질환별 일 초과사망률에 대한 한파의 건강영향을 분석하였다. 분석에 사용된 날씨유형분류(Spatial Synoptic Classification)는 각 지역별 기상요소를 활용해 날씨유형을 분류하는 데 적용되었다. 특히 DP (Dry Polar) 날씨 유형은 한반도의 전형적인 겨울 날씨를 효과적으로 나타내었으며, 고기압 장출의 영향에 따라 높은 빈도를 보였다. 본 한파의 내습에 따른 취약질환별 건강영향 분석결과를 제시하였다.

여름철 무더운 날, 야외 노동자의 과도한 열 노출은 열스트레스 증가를 야기하며 노동생산성 손실, 상해, 질환, 사망의 원인이 될 수 있다(Kjellstrom et al., 2009; NIOSH, 2016). 21세기에는 기후변화로 인해 평균기온 상승뿐만 아니라 여름철을 중심으로 폭염과 같은 극한 고온현상의 빈도와 강도가 증가할 것으로 전망되고 있기에(IPCC,

2014), 향후 수십 년간 야외 작업현장 노동자들은 더 강한 열 스트레스에 노출 되어 온열질환자나 폭염 사망자 발생이 증가할 것으로 예상된다(Lucas et al., 2014). 본 연구에서는 열스트레스 지수인 습구흑구온도지수(WBGT)를 사용하여 야외 노동자의 안전한 작업을 위해 요구되는 적정 휴식시간을 정량적으로 산출하고 여름철 계절 내 기간별 분석결과를 제시하였다.

셋째, 정책전략 개발 및 기획 연구의 일환으로 먼저, 폭염특보 정보의 경제적 가치를 평가하였다. 폭염은 다른 어떤 극한 기상현상 보다 사망자 수 증가에 큰 영향을 미친다(CDC, 2004; NWS, 2011). 그리고 폭염의 건강 영향은 고령일수록 크게 작용한다(Hajat and Kosatky, 2010). 효율적인 대비책 마련이 요구되는 가운데 서울시는 폭염으로 인한 피해를 줄이기 위해 매년 여름철 '폭염 종합대책 추진계획'을 수립·실행하고 있다. 그리고 서울시의 대비행동 의사결정에 필수적으로 투입되는 선행정보는 기상청의 폭염특보 정보이다(Seoul, 2016). 서울시가 절대적인 기준으로 활용하는 폭염특보가 정보로서의 가치가 있는지 평가하여 특보 정보의 효용성과 수용성을 높여 객관적인 활용을 확대·전파함으로써 극한기상으로 인한 사회·경제적 피해를 저감을 지원할 필요가 있다. 기상정보 가치의 정확한 분석을 위해 본 연구에서는 서울시의 65세 이상 고령자가 여름철 사용한 실제 의료비를 폭염 손실로 간주하여 폭염특보의 경제적 가치 평가를 시도하였다. 이때 비용은 서울시 폭염종합 대책의 예산액이다. 수집된 비용-손실 자료를 바탕으로 의사결정모델을 수립하여 폭염특보 정보의 경제적 가치를 정량적으로 평가하였다.

또한 비시장 재화의 경제적 가치 추정에 사용되는 컨조인트 분석을 사용하여 국립기상과학원에서 운영중인 관측장비의 활용 개선 및 예측모델 정확도 개선의 경제적 가치를 추정하였다. 컨조인트 분석은 가치를 평가하기 위한 다양한 속성과 설문 응답자의 지불의사액 사이의 상충관계를 종합적으로 고려할 수 있는 방법으로 응답자의 선호체계 분석에 중점을 둔다(Mackenzie, 1993; Adamowicz et al., 1994; Kwak et al., 2006; Jin et al., 2014). 분석을 통해 추정된 가치는 정책결정자에게 정량적 정보로 제공될 수 있다.

제 2 장 기상기술·정책 정보 동향 조사·분석 및 개발

제 1 절 기상기술·정책 정보 동향

1. 자료 및 조사 현황

(1) 조사기간 및 출처

2019년 1월부터 12월까지 총 206건의 기상기술·정책 정보 동향을 조사하였다. 월 평균 17건, 내용에 따라 정책과 기술 분야로 구분하면 각각 6건과 11건이 조사되었다. 내용에 따라 정책과 기술 분야로 구분된 정보 동향은 아래의 Fig. 2.1.1과 같다.

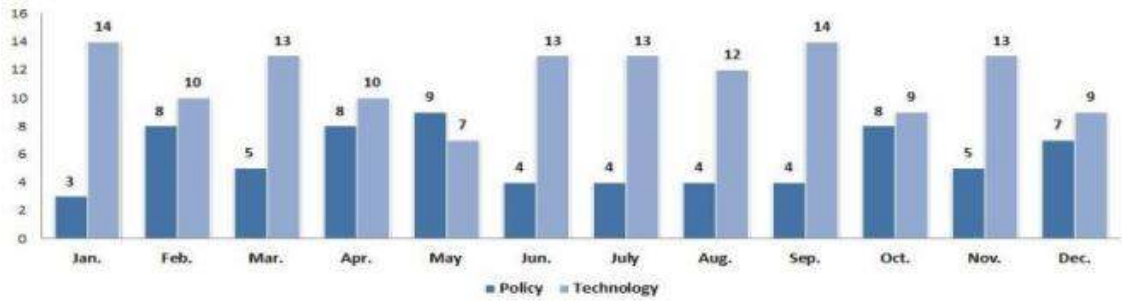


Fig. 2.1.1. Total number of collected monthly information in 2019.

조사된 정보 동향의 출처는 외국 기상청 및 연구기관, 국제기구, 국제학술지, 외국 정부기관, 뉴스 등의 웹사이트이다. 주요 출처별 월평균 동향의 수는 외국 기상청이 7건, 국제 학술지가 4건, 뉴스 사이트가 3건으로 나타났다(Fig. 2.1.2).

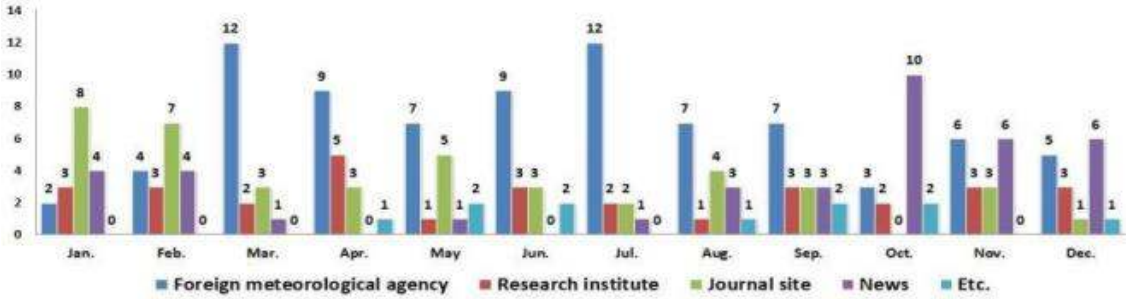


Fig. 2.1.2. Total number of sources which collected information monthly.

(2) 조사 현황

조사된 정보 동향은 그 내용에 따라 '기상기술·정책 전략', '기후', '해양', '환경기상', '관측/장비', '위험기상/재해', '응용기상' 등 7개 분야로 분류하였다. 기후변화 및 기상재해 대응을 위한 정책과 관련된 '기상기술·정책 전략' 분야는 전체의 34%로 가장 많은 비율을 차지했고, 기후변화 예측 및 적응·완화와 관련된 '기후' 분야는 전체의 21%로 '기상기술·정책 전략' 분야와 '기후' 분야를 합치면 전체의 절반이 넘는 것으로 나타났다. 기상재해 대응 및 피해 완화 등과 관련한 '위험기상/재해' 분야와 도시기상, 농업기상 등이 포함된 '응용기상' 분야는 각각 14%씩을 차지했고, 해수면온도, 극지방, 해양순환 등과 관련된 '해양' 분야는 5%를, 황사·연무, 온실가스의 예측과 관련된 '환경기상' 분야는 3%를 차지했다(Fig. 2.1.3).

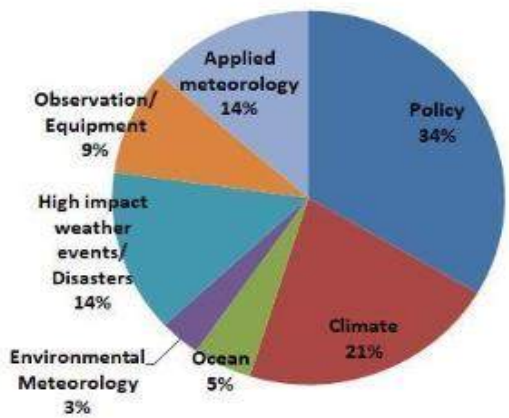


Fig. 2.1.3. The portion of sectoral field.

분석된 정보 동향의 국가별 출처는 기상선진국인 미국이 36%로 가장 많은 비중을 차지했고, 두 번째로 일본이 29%를 차지한 것으로 조사되었다. 그 다음으로 중국이 13%, 독일, 스위스, 덴마크 등을 포함한 기타 국가가 11%, 영국이 8%, 국제기구가 3%의 비중을 차지한 것으로 나타났다(Fig. 2.1.4).

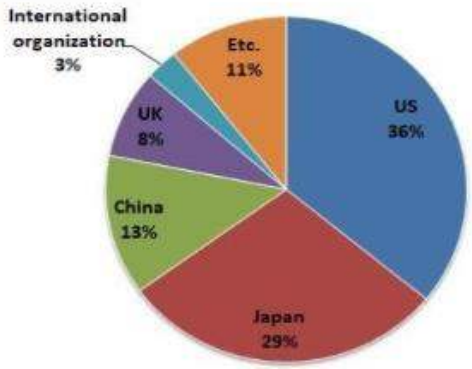


Fig. 2.1.4. The portion of international field.

정보 출처 중에서는 외국 기상청이 40%로 가장 많은 비중을 차지했다. NOAA[1], JMA[2], CMA[3], 영국 기상청인 Met Office의 동향이 포함되었다. 그 다음으로는 국제 학술지에 게재된 기상기술·정책 관련 정보 동향이 21%를 차지하였으며, 뉴스 웹사이트에서 조사된 정보 동향이 19%를 차지한 것으로 나타났다. 이밖에 기상·해양·지진 등 연구기관의 동향이 15%, IPCC[4], WMO[5], UN[6] 등 국제기구가 포함된 기사 출처가 5%를 차지한 것으로 조사되었다(Fig. 2.1.5).

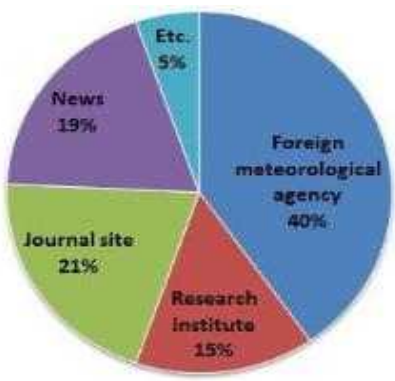


Fig. 2.1.5. The portion of the source of information.

1) National Oceanic and Atmospheric Administration, 미국 국립해양대기청
2) Japan Meteorological Agency, 일본 기상청
3) China Meteorological Administration, 중국 기상국
4) Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후변화에 관한 정부간 협의체
5) World Meteorological Organization, 세계 기상기구
6) United Nation, 국제연합

2. 분야별 주요 내용

(1) 기상기술·정책 전략

2019년에 조사된 정보 동향 중 '기상기술·정책 전략' 분야에서는 외국 기상청과 국제기구에서 발표한 최신 보고서 및 전략 계획 소개, 외국 기상청의 서비스 개선, 공동연구 개시 발표 등의 내용이 주를 이루었다. 총 69건의 동향 정보 중 미국이 36%인 25건으로 가장 많은 비중을 차지했고, 일본이 26%, 중국이 22%, 영국이 7%, 그리고 기타 국가가 8%를 차지했다. 동향 정보의 출처로는 외국 기상청이 59%로 절반 이상의 동향 정보에 미국, 영국, 일본 등 기상선진국으로 분류되는 국가의 기상청에서 발표하는 정책 전략, 서비스 개선 계획 등이 포함되었다. 그 다음으로는 뉴스 웹사이트가 23%를 차지했으며, 연구기관이 9%, 기타 출처가 9%를 기록했다.

미국 기상청(이하 NWS, National Weather Service)은 2019-2022 전략계획을 발표했다. 발표한 전략계획에는 ① 국민의 기상정보 획득·이해·행동방식 변화를 통해 기상·수문·기후로 인한 영향 저감 ② 최첨단 과학·기술·엔지니어링을 통한 최상의 관측·예보·특보 제공 ③ 인력, 파트너십 및 조직성과 분야 투자를 통해 변화에 대처 가능한 NWS 실현 등과 같은 NWS의 새로운 3가지 목표가 새롭게 수립되었다. 미국 국립대기해양청(이하 NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)은 NOAA의 연구들이 미국인의 삶에 미치는 영향 등을 설명한 「NOAA Science Report」를 발표하였다. 보고서에는 NOAA의 연구 포트폴리오 정의, NOAA가 연구에 투자하는 이유 등이 실렸으며, 블루 이코노미[7], 극한기상 대응 관련 내용도 포함됐다.

영국 기상청은 영향예보 연구의 일환으로 차량전복모델(Vehicle overturning model) 결과를 발표했다. 모델은 돌풍 예측정보·취약성·노출 자료를 결합해 주요 간선도로망의 차량전복위험 예측정보를 생성한다. 돌풍 예측정보는 '풍속 임계치 초과 돌풍 확률'을 계산하고, 취약성은 '도로의 고도, 차선 수, 도로 특성 등'을 고려했다. 노출 자료는 '시간대별 교통량 정보'를 사용하여 위험에 노출된 차량의 수를 통계조사 했다. 영구 기상청은 이러한 과정을 통해 산출된 정보를 기반으로 강풍이 예상될 때 도로 위 차량전복의 잠재적 위험도를 사용자들에게 제공한다고 밝혔다. 영국 일간지 The

7) Blue Economy, 해양생태계를 보호하는 동시에 경제성장, 생활(생계) 및 일자리 향상을 위한 해양 자원의 지속가능한 이용(출처: 위키피디아)

Guardian은 '기후변화'를 '기후위기'로 변경 표기한다고 밝혔다. 1975년 기후변화 관련 최초의 연구결과가 발표되었을 때에는 '지구 온난화(Global warming)'라는 단어가 일반적으로 사용되었으나, 현재는 '기후변화'로 순화되어 사용되고 있으며, 여러 전문가들은 이 단어가 너무 부드러운 표현이라고 지적했다. 이에 The Guardian은 상황의 심각성을 알리기 위해 '기후위기(crisis)', '기후비상(emergency)', '기후몰락(breakdown)', 또는 '지구가열(global heating)' 등으로 업데이트 한다고 밝혔다.

일본 기상청(이하 JMA, Japan Meteorological Agency)은 기상위성 Himawari 자료 등을 기반으로 기존에 제공하고 있던 1㎞규모의 기온 및 날씨를 추정한 「추정기상분포」를 알고리즘 개선을 통해 보다 정확하게 표현된 공간분포로 개선하여 제공한다. 또한 향후 농업·교통·물류 등과 같은 '산업', '건강', '생활'에서도 중요한 역할을 하는 기온 및 강우, 강설 등 보다 정확히 표현된 정보를 제공할 예정이라고 밝혔다. 이와 함께 새로 도입된 슈퍼컴을 이용한 예측정확도 향상 및 신뢰도 파악 기술 향상을 기반으로 강우량과 풍속 예보의 구체적 수치를 발표한다. 이는 지역 방재 지원에 도움이 될 것으로 기대된다.

(2) 기후

기후분야에서는 기후변화 전망과 영향에 대한 정보 동향이 다수 수집되었다. 총 44건의 동향 중 미국이 50%인 22건, 영국이 10건으로 23%를 차지했다. 이 외에 일본, 독일, 호주, 오스트리아 등 기타 국가가 11건으로 25% 조사되었다. 정보 동향별 출처는 학술지 관련 웹사이트가 28건, 64%로 가장 많은 비중을 차지했다. 그 다음으로 외국 기상청이 6건, 뉴스 웹사이트가 4건, 연구기관이 3건, 국제기구가 2건 조사된 것으로 나타났다.

IPCC는 지구환경에 대한 인류의 광범위한 영향을 알리기 위해 「기후변화와 지표(地表)」 보고서를 발간했다. 보고서에 따르면, 인류는 지표의 대부분을 사용 중이며, 1961년 대비 집약적 농경지와 식량생산이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 함께 지표 기온의 가파른 상승세와 농업분야의 온실가스 배출량 증가, 평균기온 1.5℃ 상승의 위험도 등과 같은 내용이 포함되었다.

영국 기상청은 「2018년 기후보고서」를 발간했다. 보고서에 따르면 1884년 이후 영

국의 가장 더웠던 해 Top 10의 기록은 모두 2002년 이후 발생한 것으로 나타났다. 반면, 가장 추웠던 해의 Top 10의 기록은 1963년 이후 여전히 갱신되고 있지 않으며, 영국 강설량이 1960년 이후 감소추세를 보이는 중, 2018년은 2010년 이후 가장 많은 눈이 내린 해로 나타났다.

기후과학, 기후정책 등의 최신 소식을 다루는 영국의 웹사이트인 Carbon Brief에서는 2018년 전 세계 언론에서 가장 많이 소개된 기후연구를 소개했다. 이를 위해 트위터, 페이스북과 같은 소셜미디어에 언급된 특정 주제에 대해 점수와 순위를 평가하는 Altmetric의 자료를 사용하여 2018년 가장 많이 거론된 기후변화 관련 논문 25건의 목록을 작성하고 상위 10위까지의 논문들을 바탕으로 인포그래픽을 작성하여 제공하였다.

독일 기상청(이하 DWD, Deutscher Wetterdienst)은 기후변화 시나리오뿐만 아니라 현재와 과거 기후정보를 함께 살펴볼 수 있는 '독일 기후 아틀라스(German Climate Atlas)'를 발표했다. 이를 통해 200년이 넘는 과거의 기후자료를 바탕으로 독일의 기후변화 경향 및 변동성을 살펴볼 수 있고, 독일 내 지역적 차이를 살펴볼 수 있다. 또한 21개 기후모델에서 산출된 결과를 기반으로 작성된 다이어그램은 기후 시나리오의 불확실성 범위를 확인 가능하게 하며, 기후변화에 위협을 받을 수 있는 부문별 특화 기후도는 직관적이고 사용하기 쉬운 형태로 제공되고 있다.

미국의 오하이오 대학에서는 해양과 대기에서 이루어지는 지구 열전달(heat transfer)의 미래 변화 전망을 위한 연구를 수행했다. 과거 해양의 온도와 모델의 결과를 비교하고 이에 근거하여 현재와 미래 기후변화 상황에서의 열전달 패턴 변화를 분석한 결과, 기후변화로 인한 기온 상승이 대기의 열전달을 증가시켜 해양의 열전달 감소로 이어지는 것으로 분석되었다. 또한, 해양 열전달의 감소로 남극해에 해양의 열이 과도하게 정체되어있는 것으로 나타났다. 이는 특정 시점에 열전달 균형이 깨져, 전지구 기온의 주요한 변화를 가져올 수 있으며, 이에 연구진은 미래 지구 열전달 변화 예측을 위한 연구들이 지속적으로 이루어져야 한다고 강조했다.

(3) 해양

2019년 조사된 정보 동향 중 해양분야 관련 정보는 총 10건으로 전체의 5%를 차지

했다. 그 중 일본이 5건, 미국이 2건으로 나타났으며, 출처별로는 연구기관이 4건, 외국 기상청이 4건, 뉴스 웹사이트가 2건으로 분류되었다. 해양 탄소흡수, 극지방, 해수면온도 등과 관련한 정보가 주를 이루었다.

일본 해양연구개발기구(이하 JAMSTEC, Japan Agency for Marine-earth Science and Technology)가 참여한 국제연구팀은 해수면 온도 상승이 2018년 발생한 태풍의 활동에 어떤 영향을 미쳤는지 분석한 결과를 발표했다. 2018년 7월부터 11월까지 전지구 해수면온도 편차를 분석하여 그 해 태풍 활동에 어떠한 영향을 미쳤는지 규명한 결과, 아열대 중부 태평양에서 캘리포니아 연안에 이르는 고온 편차가 태풍활동에 특히 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 남중국해에서 필리핀 서쪽에 걸친 음의 편차가 커질수록 그 해역에서의 태풍 활동에 영향을 미칠 가능성이 높은 것으로 분석되었다.

NOAA를 비롯한 국제연구팀은 이산화탄소 배출량이 증가함에 따라 해양은 더 많은 양의 가스를 흡수하지만, 배출량은 2004년 발표된 탄소조사 당시와 비교하여 상대적으로 변화가 없음을 밝혔다. 해양이 대기로부터 이산화탄소를 흡수함으로써 온실가스가 야기할 수 있는 온난화 영향을 줄일 수 있지만 해양에 녹아든 이산화탄소로 인한 해양 산성화는 조개류와 산호의 백화를 야기하고, 어류 및 해양 생물의 생존을 위협한다. 이에 연구진은 “해양의 이산화탄소 농도 상승으로 인한 심각한 영향에 대응하기 위한 조기경보시스템을 제공하기 위해 관련 업계와 협력중”이라고 밝혔다.

덴마크의 극지해양연구소(이하 AWI, Alfred-Wegener Institute)가 설립한 북극 기후연구 다학제 표류 연구소인 MOSAiC (Multidisciplinary Drifting Observatory for the Study of Arctic Climate)의 극지방 쇄빙연구선 연구진은 향후 13개월 동안 표류기지로 사용된 북극 빙원을 선정했다. 빙원 선정을 위해서 위성 이미지, 쇄빙선, 헬리콥터, 도보탐사 등 다양한 방법이 사용되었으며, MOSAiC 표류기지에서는 17개국 400여명 이상의 과학자들이 북극의 대기와 생태계에 영향을 주는 물리, 화학, 생리학적 과정을 연구할 계획이다.

영국 기상청은 NOAA, JMA와 협력하여 연구 선박 및 해양 기상관측 부이의 관측자료와 과거 선박에서 바닷물을 퍼 올려 관측하던 방법에 의한 자료의 비교연구를 수행했다. 그 결과, 배 내부에 유입된 해수의 온도를 측정하는 방식은 점차 개선되어 1960-1970년대의 오차는 약 +0.5℃에 불과했으며, 2000년대의 오차는 더욱 감소한 것

으로 나타났다. 특히, 과거 관측시 단열재의 부재로 열손실이 발생하였으나, 현재에는 태양의 영향 등의 원인으로 오히려 온도가 높게 나타나는 경향을 발견했다.

(4) 환경기상

황사·연무, 온실가스 등과 관련된 환경기상분야는 전체 조사된 정보 동향의 3%인 7건이 조사되었다. 이 중 일본이 6건, 미국이 1건으로 나타났으며, 출처별로는 외국 기상청이 3건, 연구기관이 3건, 국제 학술지 관련 웹사이트가 1건으로 조사되었다.

JMA는 1990년부터 세계기상기구(이하 WMO, World Meteorological Organization)의 온실가스에 대한 세계 데이터센터인 WDCGG (World Data Center for Greenhouse Gases)를 운영하고 있다. JMA는 WDCGG에 일본 국립환경연구소(이하 NIES, National Institute for Environmental Studies)와 일본 우주항공연구개발기구(이하 JAXA, Japan Aerospace Exploration Agency)가 개발한 온실가스 관측기술 위성 'Ibuki(2009년 발사)'의 관측자료를 새롭게 제공 개시했다. 지금까지 지상, 선박, 항공기 등에 의한 정확도 높은 '점'자료에 더해 위성에 의한 '면'자료를 합쳐서 지구 전체의 이산화탄소 농도 분포의 장기적 감시 및 지역별 배출·흡수 등 파악에 이용가능하다.

JAMSTEC과 NIES의 공동 연구팀은 독자적 방출모델 및 통계 데이터를 이용하여 도식화 한 '동아시아 CH_4 방출 분포'를 NIES 홈페이지를 통해 공개한다고 밝혔다. 연구팀은 CH_4 방출의 기원(자연적·인위적)에 대한 분포를 세부적으로 도식화 하였으며, 그 결과 동아시아 지역의 총 CH_4 방출량(2000-2012년 평균)은 연간 약 67.3백만 톤으로 최근 증가 양상이 뚜렷하게 나타나고 있는 것과 화석연료 채굴, 농업, 가축 사육 등 인위적 기원이 약 89%를 차지하는 것을 밝혔다.

미국 코넬 대학교(Cornell Univ.) 연구팀은 그동안 산업 부문의 CH_4 배출량이 크게 과소평가 되어왔음을 밝혔다. 연구진은 암모니아 비료공장의 CH_4 배출량을 측정하기 위해 센서가 장착된 Google 스트리트 뷰 차량을 이용하였다. 그 결과, 분석 대상인 6개 공장 주변 도로에서 관측된 배출량을 토대로 연간 배출량을 추정하면 25Gg으로 공장의 자체 추정치인 연간 0.2Gg보다 약 100배 이상 높게 나타났다.

(5) 위험기상/재해

2018년, 전세계적으로 극한기상현상의 피해가 극심했던 영향으로 기상재해 대응 및 피해 완화 등과 관련한 위험기상/재해분야의 정보 동향은 전체 조사된 것의 14%에 달했다. 특히 기록적 폭우와 태풍 등의 피해를 입은 일본은 전체 위험기상/재해분야 중 76%인 22건을 차지했다.

JMA는 태풍진로 예보와 관련된 확률반경의 크기와 예보 신뢰도 표현을 개선했다. 2018년부터 새롭게 운용 개시된 슈퍼컴과 수치예보모델 개선, 이용방법 개선 등을 토대로 태풍진로 예보의 정확도가 향상되었으며, 이에 따라 태풍진로 확률반경을 지금보다 약 20% 줄여서 발표한다. 또한 「호우경보 위험도 분포」를 기존의 5㎞ 해상도에서 1㎞ 해상도로 개선하여 제공 개시했다. 이를 통해 정보를 이용하는 지역주민과 지방자치단체 등은 피난이 필요한 경우를 보다 정확히 파악할 수 있고, 피난행동을 할 수 있을 것으로 기대된다. 「위험도 분포」 개선에도 불구하고 신속하게 정보전달이 되지 않았다는 지적에 따라 5개 협력사업자를 선정하여 신속한 피난이 요구되는 경계레벨 4「상당히 위험」에 해당될 때 푸시서비스를 제공한다. 또한 일본 내 거주 및 여행중인 외국인을 위해 「위험도 공간분포」를 6개 국어로 제공한다고 밝혔다.

JAMSTEC은 AI기술을 사용한 새로운 지진 판별기술(SRSpec-CNN[8])을 발표했다. 해당 기술은 지진계 기록의 Running Spectrum[9]을 이용하여 저주파 미동[10]과 지진동 신호에 대한 정확도 높은 자동 판별이 가능하다. 이를 통해 일본 남쪽 해역의 지진·해일 관측 감시 시스템(DONET, Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis)의 지진계에 기록된 저주파 미동과 지진동 신호 판별 결과, 99.5%의 높은 정확도를 달성했다.

독일의 Saarland 대학 연구팀은 뇌우 예측을 위한 시스템 개발에 성공했다고 밝혔다. 특정 지역의 뇌우를 정확하게 예측하기 위해서는 빠르게 상승하는 불안정한 공기를 조기 감지해야한다. 3차원의 공기 흐름을 2차원 위성 이미지를 활용해 예측하기 위

8) Seismic Running-Spectrum Convolution Neural Network, 지진동 신호로부터 running spectrum 화상을 생성하고, 컨블루션 신경망(CNN)을 통한 화상 인식에 독자적 개량을 더해 저주파 미동과 지진동 신호를 판별하는 일련의 프로세스

9) Running Spectrum: 지진 등 파동 신호를 포함한 주파수 성분의 시간변화를 표시하는 방법 중 하나로 세로축에 주파수 성분을 표시하고, 가로축에 시간경과를 표시하여 신호에 포함된 주파수 성분의 지속시간과 시간변화를 화상으로 표현하는 기법

10) 저주파 미동: 플레이트 경계 단층 및 그 근방에서 발생하는 느린 지진 중 하나

해 15분 간격의 위성 이미지를 사용하여 예상되는 변화를 계산하는 알고리즘에서 산출된 결과를 실제 이미지와 비교하고 그 차이를 인공지능을 활용해 다시 분석했다. 개발된 시스템을 통한 번개와 천둥의 향후 15분 예측 정확도는 96%에 달했으며, 5시간 예측 정확도는 약 83%에 달했다.

미국의 기후학자, 수문학자, 공학자 등이 참여한 연구진은 극심한 폭풍우의 빈도와 강도 증가로 인해 현재 미국 수문 설계기준 강화가 필요하다는 연구결과를 발표했다. 연구진은 1950-2017년 동안 미국 전역 900개 이상의 기상관측소 자료와 극심한 폭풍우의 발생빈도를 통계적으로 분석했다. 그 결과, 2017년 미국 동부의 극심한 폭풍우 현상의 발생빈도가 1950년 대비 85% 증가한 것으로 나타났으며(미국 서부, 51%), 그 원인으로는 기후변화로 인한 기온 상승이 지적되었다. 또한 잠재적으로 현재의 수문설계기준으로 지어진 저류지와 댐 등의 허용 용량을 넘어설 수 있는 것으로 나타났다.

(6) 관측/장비

관측/장비분야에서는 기상항공기, 부이, 드론, 관측위성 등 대기·기상 관측을 위한 기기 도입 관련 정보 동향이 주를 이루었다. 드론 실험, 위성 발사 등의 이슈가 많았던 중국이 전체 19건 중 절반 이상인 11건을 차지했다. 출처별로 살펴보면 외국 기상청이 15건으로 전체의 79%에 달했다.

중국 기상국(이하 CMA, China Meteorological Administration)은 중국의 남극 연구기지인 중산(ZhongShan)기지에서 곤륜(Kunlun)기지 방향으로 100㎞ 떨어진 빙상에 자동기상관측장비(이하 AWS, Automatic Weather System)를 설치했다. 이를 통해 판다(Panda)구역(중산기지～곤륜기지)에 대한 기상감시의 공백을 메꿔 기상관측 기능 향상에 도움이 될 것으로 기대된다. 지난 5월에는 드론을 이용해 1,500 m 연직 기상관측 실험을 실시했다. 실험에 사용된 드론의 기체는 직경 1.5 m, 비행고도 3,000 m 사양이며, 40분의 비행시간동안 지상관측소는 실시간 관측자료(온도, 기압, 습도, 풍향, 풍속 등) 및 드론 상태 정보를 수신했다. CMA는 칭하이-티벳고원 지역에서 에어로졸, 구름, 강수의 미세구조 및 공간적 변화 특성 조사를 위한 구름-강수 항공관측 실험도 진행했다. 미국 Beechcraft사의 쌍발 프로펠러 민간 다목적 항공기인 KingAir 기상항공기를 이용하였으며, KingAir 기상항공기는 50㎞ 범위 내에서 7,200 m와 7,500 m 고도

로 비행하며 에어로졸, 구름 수분 함량 및 입자 크기를 관측했다. 수집된 자료는 티벳 고원에서의 구름 정보와 지상레이더 및 위성 관측에 대한 검증 자료로 사용됐다.

NOAA는 허리케인 및 열대폭풍 관측, 기상과학 연구 등을 지원하기 위해 두 대의 기상항공기(Gulfstream G550, Beechcraft King Air 350 CER) 구매계약을 체결했다. Gulfstream G550 구매를 위해 4,070만 달러(약 481억 원)의 예산이 배정되었으며, 관측을 위한 기체 변경에 추가비용이 예상된다. 2022년 후반 도입 예정인 Gulfstream G550은 허리케인 관측을 수행 중인 Gulfstream Ⅳ-SP를 보완할 것으로 예상된다. 또한 Beechcraft KingAir 350 CER은 2021년 도입되어 눈, 토양수분 관측을 위한 원격탐사에 활용될 예정이다.

미국의 시장 조사기관인 Grand View Research는 시장 조사 보고서를 통해 “레이더 장비 시장은 연평균 4%의 성장률로 2025년경 380억 달러 이상의 가치를 가질 것”이라고 밝혔다. 레이더 장비 시장은 전 세계 보안관련 문제와 해상 무역 및 항공 여행 증가, 기후 모니터링을 위한 기상레이더 수요 증가로 인해 성장추세에 있는 것으로 나타났다. 보고서는 다양한 분야에서 레이더 장비의 수요 증가가 향후 레이더 장비 시장의 성장 동력으로 작용할 것으로 전망했다.

JAMSTEC은 수심이 낮고 지형이 복잡한 연안의 해양관측데이터 수집을 위해 바다거북의 등껍질에 관측장비를 장착하여 자료를 얻는 실험을 진행했다. 총 5마리의 바다거북의 등껍질에 장비를 장착하고, 인공위성을 통해 관측자료를 전송받았으며, 이를 통해 수개월 뒤의 해수온도변화 예측정확도 향상에 성공했다.

(7) 응용기상

응용기상 분야는 전체 정보 동향의 14%인 28건이 조사되었다. 인공지능 활용과 관련된 정보 동향이 다수를 차지했고, 도시·농업기상 관련 정보도 포함되었으며, 미국이 전체의 절반이 넘는 54%를 차지했다.

미국 펜실베니아 주립 대학 연구진은 인공지능을 사용해 기상조건에 취약한 지역을 찾아내고 분석하는 연구를 수행했다. 연구진은 유전 알고리즘[11]을 적용하여 보다 유연

11) Genetic algorithm, 진화의 핵심 원리인 자연 선택과 유전자의 개념을 이용한 최적화 기법, 주어진 문제에 대한 해답(solution)을 무작위로 생성한 뒤 이 해답 집단을 진화시켜 좋은 해답을 찾음(출처: IT 용어사전)

한 격자를 형성하고, 복잡하거나 빠르게 변화하는 날씨를 보이는 지역은 격자를 세분화해 계산 자원을 집중하게 했다. 반대로 날씨가 상대적으로 안정된 지역은 격자의 크기를 늘려 계산 자원을 적게 사용하게 했다. 그 결과, 이전과 비교했을 때 동등하거나 우수한 성능을 보였으며, 보다 컴퓨터 자원을 경제적으로 사용하는 것으로 평가됐다.

NOAA의 AFSC[12]는 인공지능 개발을 위해 기업들과 협업을 진행중이다. 연구팀은 북극 해빙의 항공측량 중에 촬영된 이미지에서 해양 포유류 및 북극곰 등을 탐지하기 위한 기술을 개발하고 있으며, 촬영된 이미지에서 물범과 북극곰의 식별을 자동화하는데 중점을 두고 있다. 개발 중인 기술은 비행 중 이미지 분석과 식별을 완료하여 이미지 검색 시간을 크게 줄일 수 있으며, 해당 동물들을 효과적으로 관리·보존하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

IBM은 2016년 일기예보 및 정보기술기업인 The Weather Company (이하 TWC)를 인수하여 모바일과 클라우드 기반의 'weather.com'을 통해 서비스를 제공하고 있다. 또한 매시간 업데이트가 가능하고, 3㎞ 해상도로 향상된 전지구 기상모델인 GRAF[13]를 출시했다 GRAF는 슈퍼컴퓨터를 활용하여 생산되며, TWC는 "집중호우가 예상될 때, GRAF가 15시간 이내 내릴 강우량 정보를 더 정확하게 제공할 수 있다."고 밝혔다.

JAMSTEC과 JST[14], 큐슈대학은 공동연구를 통해 여름철 북서태평양의 열대저기압 예측을 검증했다. 연구는 과거에 누적된 대량 시뮬레이션 자료로부터 열대저기압 발생 가능성이 높은 특징을 직접 학습하여 열대저기압을 예측하는 새로운 접근방법이다. 학습단계에서는 10종류의 심층신경망이 서로 다른 데이터를 이용하여 학습을 하고, 예측단계에서는 1장의 입력 영상에 대해 10종류의 식별기를 이용해 분류한다. 가중평균을 이용해 열대저기압의 존재 확률이 임계값을 초과한 경우 열대저기압 발생을 예측하게 된다. 이 연구는 기상 빅데이터 기반의 관측 연구 방법으로서 향후 인공지능 기술을 호라용한 새로운 태풍발생예측 실현을 위한 단서를 얻을 수 있을 것으로 평가된다.

일본 국토교통성(이하 MLIT, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism)은 NIED[15], NICT[16], WNI[17]가 LINE[18]과 협력해 연구개발하고 있는 SNS

12) Alaska Fisheries Science Center, 미국 알래스카 수산과학센터
13) Global High-Resolution Atmospheric Forecasting
14) Japan Science and Technology Agency, 일본 과학기술진흥기구
15) National Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 일본 국립방재과학기술연구소
16) National Institute of Information and Communication Technology, 일본 국립정보통신연구기구

방재 챗봇 「SOCDA」와 AI 어시스턴트 「Clova」를 활용해 주민피난·수해방지 활동 지원 프로젝트의 현장 훈련을 실시했다. 총 12개 기관과 주민이 참여한 이번 훈련에서는 SOCDA 등을 활용한 피난준비정보, 피난권고 등 방재정보제공과 Clova를 활용한 고령자 피난지원, LINE[19] 등을 활용한 피해정보 및 현지상태 구집·공유 훈련을 실시했다.

17) Weathernews Inc., 일본 기상서비스업체
18) 네이버의 일본법인, 전기통신기업
19) 네이버의 일본법인이 LINE 주식회사가 출시한 모바일 메신저 (출처: 위키백과)

제 3 장 다학제 융합기반 기술 연구

제 1 절 한파에 따른 질환별 사망률 분석

1. 연구배경

인간 보건에 영향을 미치는 위험기상 현상은 다양한 사회경제적 영향으로 인해 더욱 큰 사회적 관심을 끌고 있다(Kalkstein, 1991; Koppe and Jendritzky, 2005). 특히, 겨울철 한파는 여름에 비해 사망률과 유병률의 증가에 많은 관련이 있다(McGregor et al., 2004). 그러나 건강 영향에 대한 열-생리 과정, 행동요인, 사회경제적 요인 등 다양한 혼란변수로 인해 겨울의 초과사망률에 대한 주요 위험요소는 여름철의 위험요소만큼 아직 정량화되어 보고되지 못했다(Allen and Sheridan, 2014; Analitis et al., 2008; McMichael et al., 2003).

겨울에는 연간 최대 사망률이 관측되는 뚜렷한 계절성이 있으며(McGregor et al., 2004; Pell and Cobbe, 1999), 이러한 현상은 65세 이상 노인 및 취약질병군의 유병률 증가에 기여해왔다(Jamason et al., 1997; Keatinge et al., 2000; Keatinge and Donaldson, 2004). 선행연구의 대부분은 온도와 사망률 사이의 비선형 관계를 제시했으며, 연중 U 또는 V 모양과 유사한 추세를 띄면서(Diaz et al., 2005), 일 사망률에 미치는 영향은 최근에 더욱 증가되었다고 결론지었다(Keatinge et al., 2000; Keatinge and Donaldson 2004). 미국에서는 한파 관련 사망률(770명)이 폭염 사망률(384명)보다 평균적으로 더 높음을 분석한 결과가 있었다(Kunkel et al., 1999).

한국에서 호흡기질환은 상당한 겨울철 초과사망과 관련된 중요한 요소이다(Ha et al., 2009). 최근의 주요 연구들은 한국과 중국의 겨울철 사망률에 대한 단일 날씨변수의 영향을 분석했다(Ha et al., 2009; Ma et al., 2013). 그러나 한국에서는 종관분석 방법론에 기반한 기후와 사망률 평가는 여전히 부족하다. 따라서 본 연구는 1991-2015년을 대상으로 6대 도시에서 한파의 원인별 사망률을 조사하였다. 공간적 날씨유형 분류 모델인 SSC (Spatial Synoptic Classification) 시스템에서 가장 극단적인 한파 날씨유형(Kalkstein et al., 1996; Sheridan, 2002)과 한국 주요도시들의 질환별 초과사망 사이의 원인적 연관성을 파악하는 것이다.

2. 연구자료 및 방법

통계청에 따르면 2010년 말 기준, 서울, 대전, 대구, 부산, 광주, 인천의 총 인구는 각각 10,312,545명, 1,503,664명, 2,511,676명, 3,567,910명, 1,454,636명, 2,758,296명이다. 따라서 6대 도시에 약 2천 2백만명(전체의 44%)이 거주하고 있다. 1991년부터 2015년까지 일 사망률 자료는 국제사인분류(모든 원인; 모든 질병: A00-R99; 심뇌혈관: I00-I99; 호흡기: J00-J99) 및 연령(모든 연령 및 65세 이상)을 분류하였다. 장기간의 인구구조 변화와 계절주기를 고려하여 총 사망률 수치를 표준화하였다(Dixon et al., 2005). 기준(또는 예측) 사망자수에 따른 일사망률 표준화를 위해 직접표준화 절차를 사용했다. 매년 겨울철 평균 일사망률 데이터를 기반으로 연도별 단순선형회귀분석을 수행하고, 각 특정 원인에 대한 초과사망률은 연도별 회귀선 중심과의 차이로 표현되었다.

최근 25년간 서울의 일최저기온과 10만명 당 모든원인 사망률 사이의 관계가 Fig. 3.1.1에 제시되었다. 본 25년 평균 시계열은 온도와 사망률 사이의 장기적 상관관계를 보여준다. 그리고 겨울철 사망률 최고점과 여름 최저점으로 대표되는 계절성(McGregor et al., 2004; Pell and Cobbe, 1999)이 국내에서도 분명하게 관측되었다. 동절기는 365.2의 평균 초과사망자수를 나타내는데 서울에서 매일 겨울철에 4명의 초과사망이 발생함을 의미한다. 따라서 이러한 계절성은 극단적인 계절 변동이 건강 위험요소가 될 수 있음을 지시한다. 기본적 계절성은 날씨 변화 및 변동성이 확연한 중위도에서 나타나는 일반적 결과이다. 본 분석에서는 SSC (Sheridan, 2002) 분류 내 가장 극단적 날씨유형이 겨울철 초과사망률에 미치는 영향에 중점을 두었다.

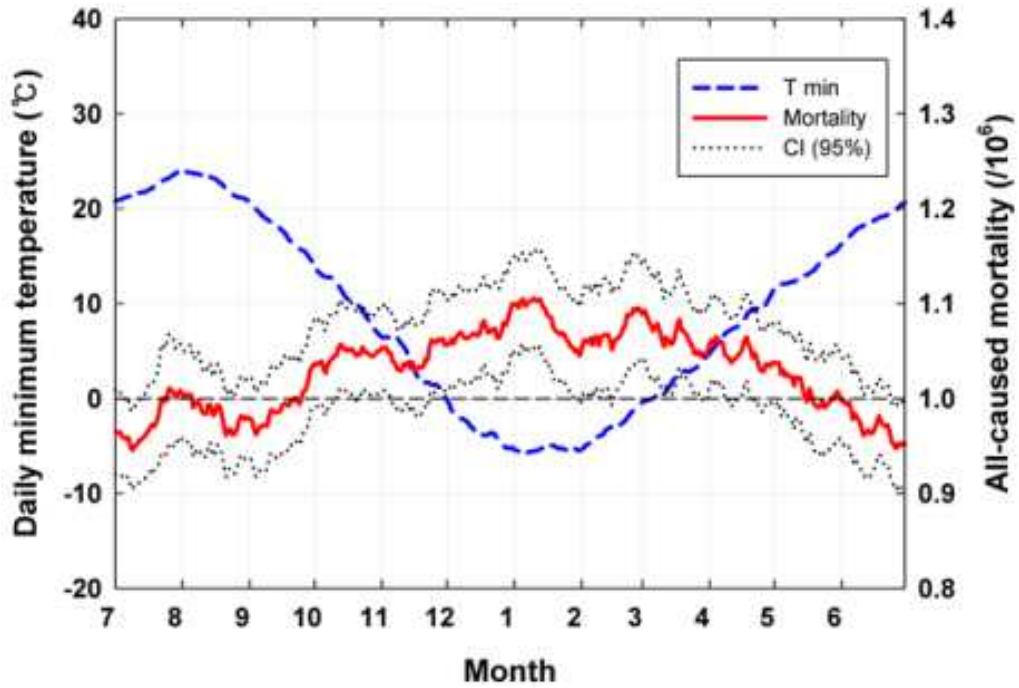


Fig. 3.1.1. The 25yr (1991-2015) climatological relationship of seasonal cycles between all caused mortality and daily minimum temperature in Seoul, Korea.

매일의 날씨유형을 생성하기 위해 각 도시별 최장기간 기후자료를 입력변수로 사용했다. 온도, 이슬점온도, 해수면기압, 동서 및 남북 바람성분, 전운량의 일 4회(0300, 0900, 1500 및 2100) 관측값을 활용하였다. 각 기상변수는 해당 지역에서 발생한 '실제' 일자의 기후특성과 장기간 통계범위를 기반으로 날씨유형을 분류하는데 사용되었다(Sheridan, 2002). 본 방법론은 내습기단(Kalkstein and Greene, 1997)에 따른 영향의 평가 및 기상조건 분석에 활용되고 있다(Hondula et al., 2014; Sheridan and Kalkstein, 2004; Lee et al., 2018; Michelozzi et al., 2010; Tan et al., 2004; Vanos and Cakmak, 2014).

3. 결과 및 고찰

Table 3.1.1은 6대 도시에서 분류된 한파 날씨유형의 평균적 기상특성을 나타낸다. 겨울철에 DP일은 43.9%의 빈도로 가장 빈도가 높았고, 시베리아기단(대륙성 cP)의 확장에 따른 영향을 나타내어 가장 기온이 낮은 기상특성을 나타낸다. DP일 동안, 전체 도시에서 기상 특성은 전형적 대륙성 고기압 특성을 보였으며, 이는 지면의 강한 북서풍, 저온 및 적은 전운량으로 장파복사가 원활하여 지표의 야간복사냉각이 활발한 날이다. 또한 본 분석에서의 한파 정의는 율리우스 일을 나타내는 계절의 시간을 고려함으로써 첫 한파 및 인체 적응 후에 내습하는 한파의 시간적 차이를 고려가능하다.

Fig. 3.1.2는 6대도시를 평균한 한파 이후의 질환별 일평균 사망률 변화를 나타낸다. 모든 지역에서 강한 한파 6일 후에 초과사망률이 최고값을 나타내었다. 특히, 모든 질병(13.8%, 95%CI: 7.0), 심뇌혈관 고령자(10.0%, 95%CI: 6.7), 호흡기 고령자(11.8%, 95%CI: 7.3)에서 6일 후 최고 사망률이 관찰되었다. 이 결과는 DP+보다 기저질환이 있는 65세 이상 고령자 사망률이 DP++ 이후에 더욱 높고 건강영향이 지속적임을 보여주는 결과이다. 이는 한파 강도, 연령, 시간지연효과(Time lag)의 부분적 기여를 나타낸 것으로, 향후 지역별, 질환별 상세분석의 필요성을 제시한다.

본 연구에서는 초과사망률 발생에 따른 추수효과(사망률 피크 이후 평소 대비 낮은 사망률 지속현상)는 관측되지 않았으며, 이는 시간지연효과에 따른 기후순응(Acclimatization)이 발생하지 않았다(Diaz et al., 2005). 그럼에도 불구하고, 모든 원인별 사망률에서 지속적인 건강 영향이 관측되었다. 향후 지역적 건강영향 차이에 대한 검증을 위해 동아시아 도시 간 비교 연구 또는 대륙 간 비교 연구가 필요하다.

최근 몇 년 동안 기상청은 특보제 기준의 개선운영뿐만 아니라, 폭염・한파영향예보를 대국민 서비스 하는 등 사회경제적 취약계층 지원을 위한 많은 정책적 노력을 기울이고 있다. 향후 수요자 중심의 다양한 응용기상모델의 예측정확도 개선을 위해 노력해야 할 필요성이 있다. 특히 국민 보건과 관련된 국가적 대응(고온・한파 건강경보 시스템 등)뿐만 아니라 개인의 위험기상 인식 개선을 위한 다양한 홍보 노력을 경주함으로써 기후변화로 인해 날로 증가되는 보건기상 취약성 대응에 이바지 할 수 있을 것이다.

Table 3.1.1. Mean meteorology characteristics of sub-divided cold spell in this study (1991-2015). To characterize more cold-stressful days, DP subsets, DP+ and DP++ were suggested

Location	Criterion	Number of days (%)	Weather condition														
						Morning (03LST)						Afternoon (15LST)					
			T mean	T max	T min	T (℃)	Td (℃)	SLP (hPa)	U	V	TCA	T (℃)	Td (℃)	SLP (hPa)	U	V	TCA
Seoul	DP+	227(10.5)	-5.4	-1.5	-8.9	-7.3	-15.8	1026.9	1.7	-0.9	1	-2.1	-16.2	1025.9	3.1	-0.8	2
	DP++	160(7.4)	-8.6	-4.8	-11.9	-10.6	-19.0	1027.2	2.0	-0.9	1	-5.5	-19.4	1026.4	3.3	-1.2	1
Daejeon	DP+	153(7.1)	-5.0	0.1	-9.6	-7.6	-12.7	1028.3	1.2	-1.0	3	-0.6	-14.0	1026.6	1.8	-1.8	3
	DP++	68(3.1)	-7.8	-2.7	-12.5	-10.6	-15.2	1028.0	0.9	-1.4	2	-3.4	-15.5	1026.6	1.4	-1.7	3
Daegu	DP+	138(6.4)	-3.8	1.0	-7.7	-5.5	-14.9	1026.0	2.8	-0.8	1	0.9	-16.5	1024.3	4.2	-1.5	1
	DP++	41(1.9)	-6.9	-2.2	-10.9	-8.0	-17.0	1026.2	3.0	-0.9	1	-1.9	-18.7	1025.2	4.1	-1.7	1
Busan	DP+	169(7.8)	-1.2	3.7	-5.0	-3.8	-16.1	1023.9	1.8	-1.8	1	3.1	-15.4	1022.9	2.7	-1.5	2
	DP++	41(1.9)	-3.7	0.9	-7.4	-6.0	-17.2	1023.8	1.7	-1.4	0	0.2	-17.8	1023.2	2.9	-2.3	1
Gwangju	DP+	108(5)	-3.1	1.5	-6.9	-5.4	-10.2	1029.0	-1.1	-1.8	4	0.7	-10.8	1027.7	0.3	-1.9	3
	DP++	35(1.6)	-5.5	-1.1	-9.2	-7.8	-12.3	1029.2	-1.5	-2.0	4	-1.9	-11.6	1027.8	0.4	-2.2	3
Incheon	DP+	204(9.4)	-4.9	-1.3	-8.2	-6.8	-14.8	1027.0	0.3	-3.5	1	-2.5	-14.2	1026.3	1.9	-3.0	2
	DP++	117(5.4)	-7.5	-3.8	-10.8	-9.9	-17.7	1027.8	0.4	-3.8	1	-5.4	-16.7	1027.4	1.7	-3.6	1

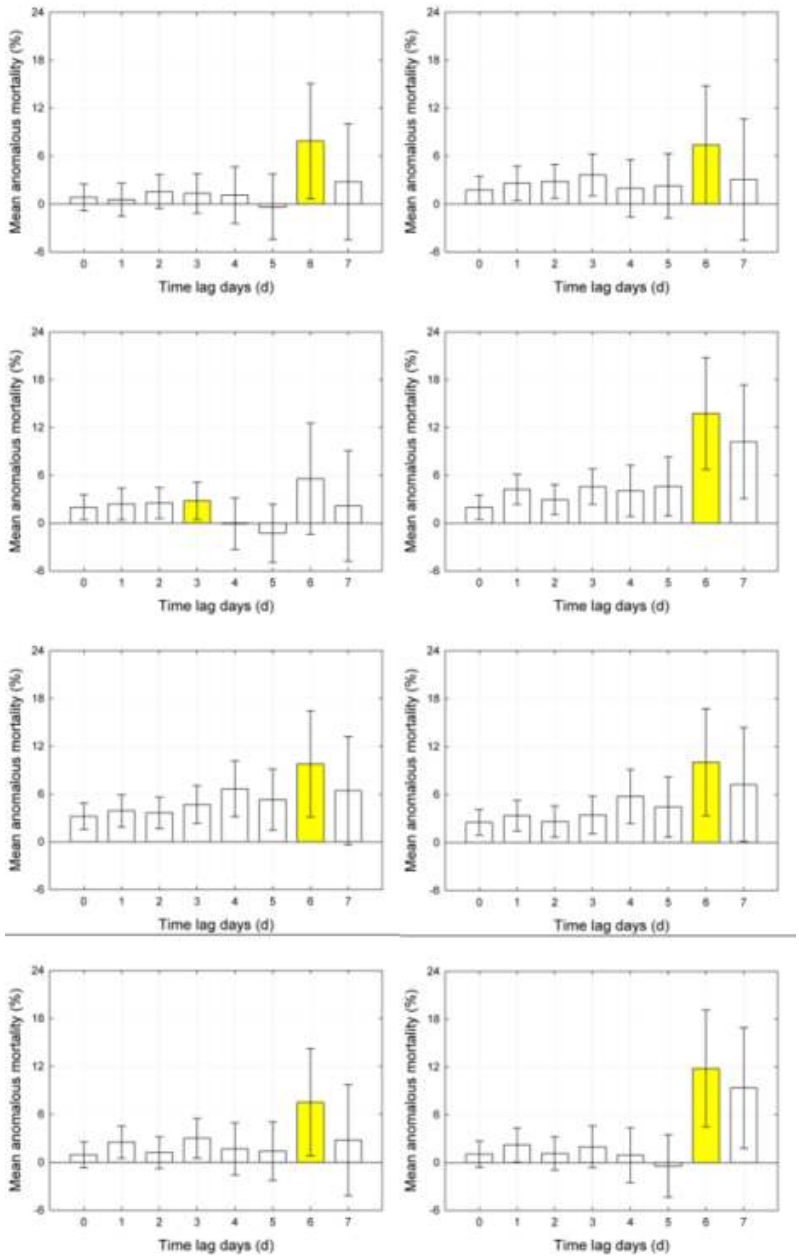


Fig. 3.1.2. DP++ effects on averaged cause-specific excess mortality 6 metropolitan cities in Korea during winter DJF period (1991-2015). Error bar indicates 95% confidence interval.

제 2 절 여름철 야외 노동자의 적정 휴식시간 분석

1. 연구방법

여름철 야외 노동자가 체감하는 열스트레스 현황과 휴식시간을 정량화하기 위한 온열지수로 기온, 일사, 상대습도, 복사열 등을 고려하는 습구흑구온도지수(wet-bulb globe temperature, 단위:℃, 이하 WBGT)를 사용하였다. WBGT지수 산출에 필요한 습구온도(Natural wet bulb temperature), 흑구온도(Black globe temperature)는 표준기상관측장비에서 관측되지 않기에 기상청 종관기상관측시스템에서 관측한 기상자료를 사용하여 추정한 값을 사용하였다. 그 후 WBGT지수에 따른 야외 작업환경의 열스트레스 존재 여부와 온열질환자 발생과의 관련성을 파악하고 한국산업안전보건공단에서 권장하는 작업-휴식 시간비를 사용하여 여름철 시기에 따른 적정 휴식시간을 정량화하여 제시하였다.

(1) 종관기상관측시스템 자료

최근 10년(2009-2018년) 여름철(6-8월) 기상청 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System)의 시간별 기상관측자료를 사용하였다. WBGT지수 산출에 필요한 일사량 자료를 10년 이상 관측하고 있는 관측소는 2018년 기준 도서산간지역(대관령, 흑산도 지점)을 제외하고 27개 이다(Table 3.2.1). 분석에 사용한 자료는 기온, 습도, 기압, 풍속, 일사량, 강수량 자료이다.

Table 3.2.1. Geographical information of Automated Synoptic Observing System used in calculation WBGT

Station ID	Name	Latitude (°)	Longitude (°)	Height (m)
101	Chuncheon	37.9026	127.7357	76.47
104	Bukgangneung	37.8046	128.8554	78.9
105	Gangneung	37.7515	128.891	26.04
108	Seoul	37.5714	126.9658	85.67
112	Incheon	37.4777	126.6249	68.99
114	Wonju	37.3376	127.9466	148.6
119	Suwon	37.2723	126.9853	34.84
129	Seosan	36.7766	126.4939	28.91
131	Cheongju	36.6392	127.4407	58.7
133	Daejeon	36.372	127.3721	68.94
135	Chupungnyeong	36.2202	127.9946	243.7
136	Andong	36.5729	128.7073	140.1
138	Pohang	36.032	129.38	3.94
143	Daegu	35.878	128.653	53.5
146	Jeonju	35.8408	127.119	61.4
156	Gwangju	35.1729	126.8916	72.38
159	Busan	35.1047	129.032	69.56
165	Mokpo	34.8169	126.3812	38
184	Jeju	33.5141	126.5297	20.45
185	Gosan	33.2938	126.1628	71.47
192	Jinju	35.1638	128.04	30.21
251	Gochanggun	35.4266	126.697	54
252	Yeonggwanggun	35.2837	126.4778	37.2
253	Gimhaesi	35.2267	128.893	53.34
254	Sunchanggun	35.3714	127.1286	127
255	Bukchangwon	35.2264	128.6725	48.8
257	Yangsansi	35.3072	129.02	14.85

(2) WBGT지수 산출

일사의 영향을 받는 야외 WBGT지수는 습구온도, 흑구온도, 건구온도로부터 산출된다(Yaglou and Minard, 1956). (Eq. 3.2.1)

$$Outdoor\ WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a \quad \text{Eq. 3.2.1}$$

여기서, Tw는 자연습구온도(단위: ℃), Tg는 흑구온도(단위: ℃), Ta는 건구온도(단위: ℃)이다. 습구온도와 흑구온도를 추정하기 위해서는 기온, 습도, 풍속, 일사량, 현지기압으로부터 WBGT지수를 추정하는 Liljegren et al. (2008)의 물리모델을 사용하였다. 습구온도와 흑구온도는 비선형적 특징을 보이기에 정확한 추정을 위해서는 반복법이 이용된다. 열역학 법칙을 기반으로 하기 때문에 상당히 신뢰할 만한 결과를 제공하는 것으로 보고되고 있으며(Alfano et al., 2014), 미국산업안전보건국(Occupational Safety and Health Administration)은 WBGT관측이 이루어지지 않는 경우 대안적으로 Liljegren et al. (2008)의 모델을 통해 WBGT지수를 산출하는 것을 권장하고 있다(OSHA, 2017). 해당 방법을 통해 산출된 WBGT지수의 오차범위는 91 - 100%에서 1℃ 이내 이다(Liljegren et al., 2008).

(3) 온열질환 응급실감시체계 자료

질병관리본부는 2011년 이래로, 온열질환자 발생추이를 신속히 파악하여 국민에게 폭염에 대한 위험을 전달하기 위한 목적으로, 전국 약 500여개 응급실 운영 의료기관에 내원한 온열질환자에 대한 표본 감시를 수행하고 있다. 해당 자료에는 온열질환 발생일시, 발생장소, 온열질환 명 등의 정보가 포함된다(KCDC, 2018). 본 연구에서는 열스트레스와 온열질환 환자 발생과의 관계를 분석하기 위해서 여름철 자료를 포함하고 있는 2012년부터 2018년까지 최근 8년간 질병관리본부의 온열질환 응급실감시체계 자료를 사용하였다. 이때, 실외 논/밭, 실외 작업장에서 발생한 온열질환자 4,909명을 야외 작업장에서 발생한 온열질환자로 간주하였다.

(4) WBGT지수에 따른 온열질환자 발생 추이

한국산업안전보건공단에서 제시하는 WBGT지수 임계치가 야외 노동자의 열스트레스를 평가하기에 적합한지를 검토하기 위해 WBGT지수와 온열질환자 발생 사례와의 관계를 분석하였다. 이를 위해 27개 종관기상관측시스템에서 추정한 WBGT지수의 평균값과 해당 일에 발생한 온열질환자의 수의 관계를 산포도로 나타내고 단위 시간 사건의 발생 빈도를 예측할 수 있는 포아송 회귀(Poisson regression)식을 제시하였다.

(5) 여름철 야외 노동자의 적정 휴식시간 산출

여름철 노동자에게 필요한 적정 휴식시간을 산출하기 위해 한국산업안전보건공단에서 권장하는 WBGT지수와 노동강도에 따른 작업-휴식 시간비(KOSHA, 2017)를 사용하였다(Table 3.2.2). 이때 사용되는 WBGT지수의 임계치는 열스트레스 상황이 존재할 수 있는지의 여부를 평가하는 초기 스크리닝 도구로(ACGIH, 2015), 직접적인 생리학적 한계는 아니지만 노동자가 고온 작업환경 하에서 작업 활동을 안전하게 수행할 수 있는 안전 기준을 나타낸다(Dunne et al., 2013). 시기에 따른 적정 휴식시간을 제시하기 위해 KMA (2011)와 Seo and Byen (2002)이 각각 제시한 여름장마와 가을장마기간을 기준으로 여름철을 초여름(6.1.-6.21.), 여름장마(6.21.-7.20.), 여름철 성하기(7.21.-8.12.), 가을장마(8.13.-8.31.)로 구분하였다. 또한, 일반적인 야외작업 가능일의 기준으로 일강수량 5㎜를 사용하는 것을 고려하여 일강수량 5㎜ 미만인 사례에 한해 분석을 수행하였다. 최종적으로 시간별 WBGT지수와 노동강도에 따라 산출된 적정 휴식시간은 여름철 시기와 시간대별로 평균하여 나타내었다.

Table 3.2.2. Permissible heat exposure threshold limit value (WBGT, ℃) (KOSHA, 2017)

Work/rest regimen (Each hour)	Work load	
	Moderate (200-350 ㎉ h^{-1})	Heavy (350-500 ㎉ h^{-1})
Continuous work	26.7	25
75% Work, 25% rest	28	25.9
50% Work, 50% rest	29.4	27.9
25% Work, 75% rest	31.1	30

2. 결과 및 분석

(1) 우리나라 주간 WBGT지수의 특성

Fig. 3.2.1는 최근 10년 여름철 평균 WBGT지수의 시간별 변화를 나타낸다. 주로 야외 노동이 이루어지는 주간 평균 WBGT지수는 24.7℃의 값을 보이며, 최저 및 최고 WBGT지수는 각각 21.4℃, 26.2℃로 4.8℃의 편차를 보인다. 특히, 일최고 WBGT은 12:00-13:00에 나타나며, 이는 일최고기온(28.0℃)이 나타나는 시간(14:00-15:00)에 비해서 약 2시간 더 빠르다. 일최고 WBGT지수는 동일 시간대 기온에 비하여 약 1.5℃가 더 낮다. 기온에 비해 낮은 WBGT지수의 특성은 고용주와 노동자들이 야외 열환경을 파악하는데 있어 잘못된 해석을 야기할 수 있기에 주의해야할 필요가 있다(Alfano et al., 2014).

가장 더운 시간대인 11:00-15:00의 WBGT지수는 전반적으로 휴식없는 지속적인 작업이 가능한 수준의 중등작업(200-350 ㎉ h^{-1}까지의 열량이 소요되는 작업을 말하며 물체를 들거나 밀면서 걸어 다니는 일 등을 뜻함) 임계치인 26.7℃에 근접하거나 혹은 이하의 수준에 머무르는 것으로 나타났다. 그러나 중작업(350-500 ㎉ h^{-1}까지의 열량이 소요되는 작업을 말하며 곡괭이질 또는 삽질하는 일 등을 뜻함)의 임계치인 25℃를 넘기에 해당 강도의 노동을 수행하는 노동자의 신체에 열스트레스가 가해질 것으로 예상된다.

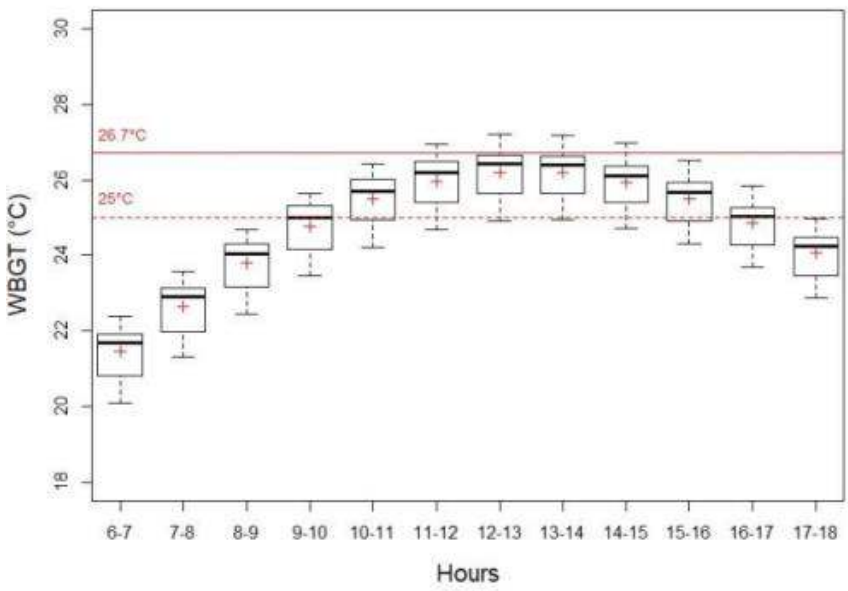


Fig. 3.2.1. Boxplot of daytime (06:00-18:00) WBGT in summer.

Fig 3.2.2는 최근 10년 여름철 평균 WBGT지수 및 WBGT지수 26.7℃ 초과일 수의 변화를 나타낸다. 여름철 평균 WBGT지수는 2018년 가장 높은 값을 기록하였으며, 다음으로 2013년, 2010년, 2016년 순이었다. 열스트레스 존재 여부의 기준이 되는 WBGT지수 26.7℃ 초과 일수는 평균 23.3일 이었으며 특히, 2018년은 39일(여름철의 42.4%)에 달하여 노동자의 지속적인 열 노출로 인해 건강과 복지에 잠재적으로 부정적인 영향을 미쳤을 것으로 평가된다(Kjellstrom et al., 2014).

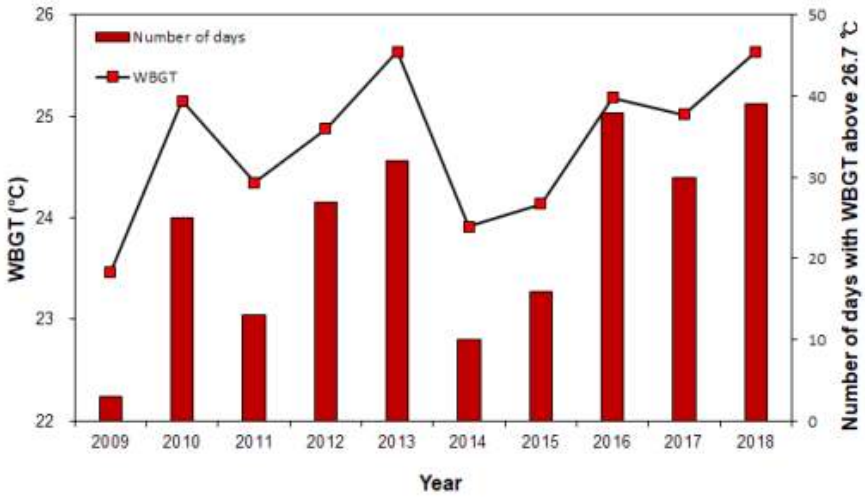


Fig. 3.2.2. Trend of average WBGT and number of days with WBGT above 26.7℃ (Jun.-Aug.).

(2) WBGT지수와 온열질환자 발생과의 관련성

최근 7년간(2012-2018년) 실외 논/밭/작업장에서 발생한 온열질환자 신고자 수는 4,909명으로 실외 전체에서 발생한 온열질환 신고자 수(8,790명)의 절반 이상을 차지하였다. WBGT지수와 실외 논/밭/작업장에서 발생한 온열질환자와의 관련성을 분석한 결과 온열질환자의 수는 주간 WBGT지수가 약 26℃를 넘었을 때 증가하는 비선형적 패턴을 보였다(Fig. 3.2.3). 특히, 실외 논/밭 노동자에 비해 비교적 높은 신진대사율을 요구하는 실외작업장의 노동자는 상대적으로 낮은 WBGT지수에서부터 온열질환 발생이 급격하게 증가함이 나타나 고열 환경에 보다 취약함을 보였다. 고열작업 환경지침에 제시된 중등작업, 중작업의 열스트레스가 존재할 가능성이 있는 임계치가 각각 26.7℃, 25.0℃인 것을 고려할 때, WBGT지수의 임계치가 야외 노동자의 열관련 질환의 발생 증가를 야기하는 열스트레스의 노출 정도를 합당하게 대표할 수 있을 것으로 판단된다.

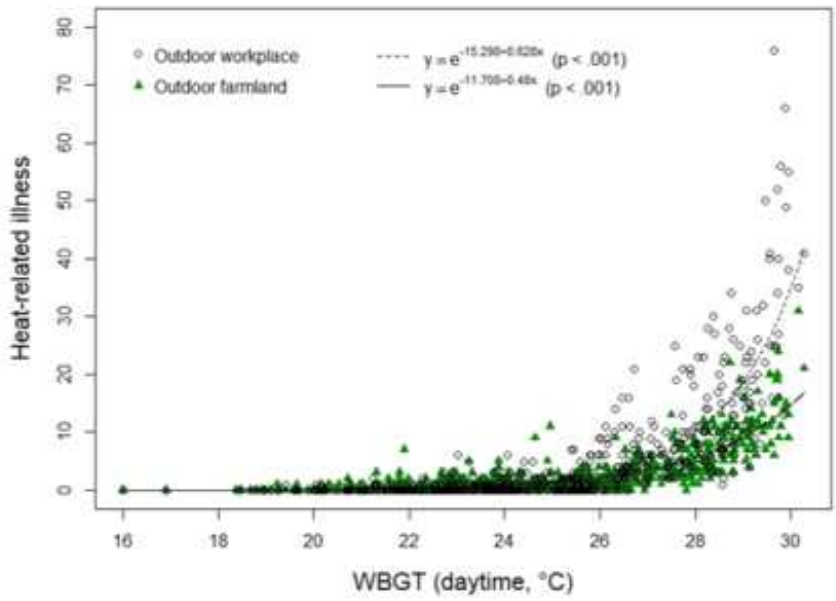


Fig. 3.2.3. Change of heat-related illness responded to daytime WBGT with the predicted frequencies from the Poisson regression (2012-2018).

(3) WBGT지수에 따른 야외 노동자의 적정 휴식시간

WBGT지수 임계치에 따른 작업-휴식 시간비를 사용하여 최근 10년간 발생한 휴식시간을 평균하고 이를 여름철 시기와 시간대별로 구분하여 나타내었다(Table 3.2.3). 노동자의 온열질환 예방을 위해 매시간 요구되는 적정 휴식시간은 중등작업에서 5.3분(8.8%), 중작업에서 10.6분(17.7%) 수준 이였으며 시기적인 차이를 보였다. 특히, 여름철 성하기 매시간 요구되는 휴식시간은 중등작업 수준에서 평균 12.1분(20.1%), 중작업 수준에서 평균 20.7분(34.5%)이 요구되어 폭염특보·주의보 발령 시 권장되는 매 시간 10분의 휴식시간을 초과함을 보였다. 최소 휴식시간이 10분 이상의 값을 보이는 시기는 중등작업을 수행하는 경우 가을장마(12.7분) 시기에도 나타나 고강도의 야외 작업 수행 시 여름철 성하기 이외의 경우에도 지속적인 관심과 휴식시간 배분 계획 등의 대책마련이 필요할 것으로 판단되었다. 한편, 초여름에는 노동자 휴식시간의 최소 요구치가 평균적으로 1분 이하의 값을 보여 대부분의 야외 작업환경에서 열스트레스가

존재하지 않을 것으로 판단되었다.

Table 3.2.3. Average rest time for outdoor worker according to the work load and summer sub-period (Jun.-Aug.)

Work load	Time	Rest time per hour (minutes/hour(%))				
		Early summer (6.1.-6.20.)	Changma period (6.21.-7.20.)	Mid-summer (7.21.-8.12.)	Late-summer (8.13.-8.30.)	All
Moderate (200-350 kcal h^{-1})	Day time (06:00-18:00)	0.1 (0.17%)	3.3 (5.5%)	12.1 (20.1%)	6 (10.1%)	5.3 (8.8%)
	Hottest time (11:00-15:00)	0.3 (0.4%)	6.2 (10.3%)	19.6 (32.7%)	10.6 (17.7%)	9 (15.0%)
Heavy (350-500 kcal h^{-1})	Day time (06:00-18:00)	1.0 (1.7%)	8.7 (14.4%)	20.7 (34.5%)	12.7 (21.1%)	10.6 (17.7%)
	Hottest time (11:00-15:00)	2.3 (3.9%)	13.8 (23%)	28.6 (47.6%)	19.1 (31.9%)	15.8 (26.3%)

제 4 장 정책전략 개발 및 기획 연구

제 1 절 폭염특보 정보의 경제적 가치 평가

1. 연구방법

(1) 의사결정모델

의사결정자는 기상예보 정보를 활용하여 위험기상에 대한 대비행동의 실행 여부를 선택한다. 의사결정자의 대비행동은 실제 위험기상현상 발생·미발생에 따라 맞거나 틀린 선택이 된다. 그리고 그러한 선택의 결과에 따라 비용 혹은 손실이 발생한다(Gray, 2015).

Fig. 4.1.1은 서울시가 폭염 피해를 저감하기 위한 대비행동의 결정과 실제 기상현상의 발생 여부에 따라 부담하게 되는 비용-손실의 결정 과정을 보여준다. 기상청은 일 최고 기온이 33℃ 혹은 35℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 각각 '폭염 주의보'와 '폭염 경보'를 발표한다. 서울시의 대비행동 결정은 기상청에서 제공하는 폭염특보에 따른다. 폭염 현상 발생에 대비하여 서울시가 적절한 조치를 취할 경우 손실은 완화될 수 있지만, 제대로 대비하지 못하면 손실이 발생한다. 한편, 기상청의 폭염 발생 예측이 틀리면, 사용하지 않아도 되었을 변동비를 추가 지출한 것으로 가정한다.

본 연구는 Fig. 4.1.1의 의사결정 과정 개념도를 기반으로 서울시 폭염종합대책에 소요된 비용과 65세 이상 고령자의 폭염 관련 건강보험 청구 금액을 사용하여 폭염특보의 경제적 가치를 평가하였다.

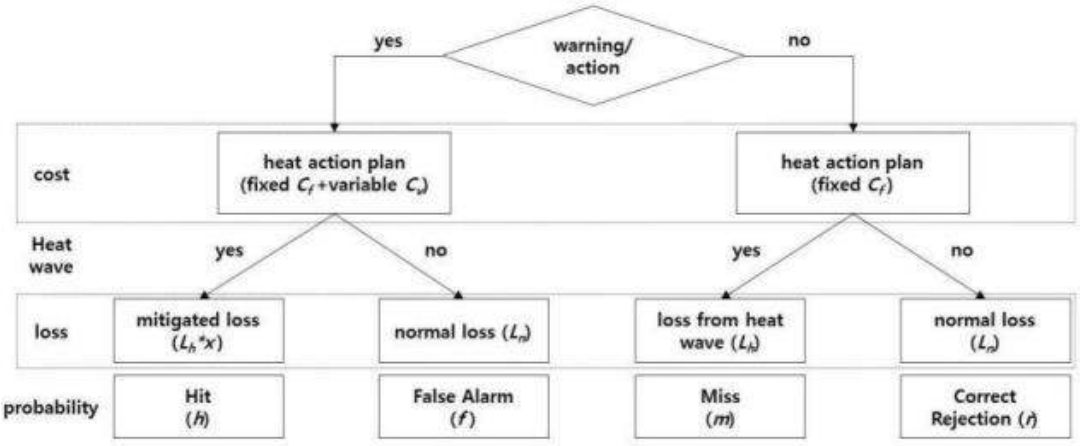


Fig. 4.1.1. Decision paths implemented in the model.

(2) 예보 정보의 경제적 가치 평가

폭염특보 정보의 경제적 가치를 평가하기 위해 많은 연구자들에 의해 개념이 확장되어 온 비용-손실 모형을 사용하였다. 비용-손실 모형은 위험기상에 대비하는 행동과 실제 위험기상 발생 여부 사이의 발생 비율 및 각각의 경우에 수반되는 비용 혹은 손실을 통해 기상정보의 경제적 가치를 평가한다(Lee and Lee, 2007).

Table 4.1.1. 2×2 contingency table for valuation of weather forecast

		Forecast adverse weather / Protective action	
		Yes	No
Observed adverse weather	Yes	Hit (h) Mitigated Loss (L_m)	Miss (m) Loss (L)
	No	False Alarm (f) Cost (C)	Correct Rejection (r) None (N)

$$L_m = (C_f + C_v) + L_h \times x,\ L = C_f + L_h,\ C = (C_f + C_v) + L_n,\ N = C_f + L_n$$

C_f와 C_v는 각각 서울시 폭염종합대책(이해 '폭염대책')의 고정비와 변동비이고, L_h와 L_n은 각각 폭염시와 평상시의 서울시 고령자 건강보험 청구금액이다. x는 서울시의 폭염대책으로 감소하는 손실 비율이다. Benmarhnia et al. (2016)은 이중차분법

(Difference-in-Differences Approach)으로 정책적 폭염대비 행동(Heat Action Plans, HAPs)의 사망자 감소 효과를 증명했다. 그 결과, HAPs는 일평균 38.7명의 비사고 사망자 표본에서 하루 2.52 명의 사망자를 감소시킬 수 있는 것으로 평가되었다. 본 연구는 질환으로 인한 병원 방문에 초점을 맞춰 Benmarhnia et al. (2016)의 사망자 분석과 차이가 존재하지만, 보수적 접근을 통해 예보 정보 가치의 과대평가를 방지함으로써 결과에 대한 수용력을 높이고자 서울시의 폭염대책으로 6.51%(2.52÷38.7)의 손실을 감소시키는 것으로 가정하였다. 따라서 상수 x는 0.9349이다.

기상청이 제공하는 폭염특보 사용시 서울시가 기대할 수 있는 총 비용은 Table 4.1.1.의 모든 비용-손실과 발생확률간의 곱을 모두 더한 값이다(Eq. 4.1.1).

$$E_f = L_m \times h + L \times m + C \times f + n \times r \qquad \text{Eq. 4.1.1}$$

폭염특보가 없다면 서울시는 일반적으로 항상 대비행동을 하거나 반대로 대비행동을 전혀 취하지 않을 수 있다. Wilks (2001)는 $\frac{C}{L}$와 $\bar{o}$간의 비교를 통해 '항상 대책 실시' 혹은 '항상 대책 미실시'를 결정할 수 있다고 했지만, 폭염으로 인한 심각한 피해와 공공기관으로 시민의 안전을 위해 노력해야 하는 서울시의 재해예방 의무를 고려할 때, 대비행동을 항상 취하지 않는 것은 상상할 수 없다. 본 연구에서는 E_{nf}를 계산하기 위해 항상 대비행동을 실시하는 경우를 가정하였다. 그 경우 E_{nf}는 Eq. 4.1.2로 계산된다. $\bar{o}$는 폭염 발생의 기후학적 확률이다.

$$E_{nf} = L_m \times (h + m) + C \times (f + r) \qquad \text{Eq. 4.1.2}$$

이론적 연구들에서 $N=0$으로 설정되는 경향으로 인해 완전한 예보 사용시 기대비용은 $\bar{o} \times L_m$으로 단순화 된다. 하지만 본 연구에서는 서울시가 대비행동을 취하지 않을 때도 폭염대책 고정비가 소요되고, 평상시의 폭염 관련 질환에 대한 건강보험 청구금액이 고려되므로 완전한 예보 사용으로 인한 기대비용은 Eq. 4.1.3과 같다.

$$E_p = \bar{o} \times L_m + (1 - \bar{o}) \times N \qquad \text{Eq. 4.1.3}$$

완전한 예보에 대한 현재 예보의 성능을 가늠할 수 있는 VS와 별개로 폭염특보의 실제 가치 평가는 Eq. 4.1.4처럼 예보 미사용에 따른 기대 비용과 예보 사용에 따른 기대 비용 간의 단순 차이로 계산하였다(Gruenigen et al., 2014).

$$EV = E_{nf} - E_f \qquad \text{Eq. 4.1.4}$$

(3) 연구자료

기상자료는 「기상정보개방포털」에서 제공하는 '서울·인천·경기도 폭염특보'와 '서울(지점번호: 108) 일최고기온'을 사용했다. 폭염특보의 발효와 해제는 일별이 아닌 시간별로 발표되었다. 폭염은 주로 낮 2시를 전후해 발생하므로 오전에 폭염특보가 해제되거나 저녁부터 폭염특보가 발효된 경우는 해당일에 폭염특보가 발효되지 않은 것으로 코딩하였다.

2016년 여름 당시 일최고기온 기준 서울은 총 24일의 폭염이 발생했다. Table 4.1.2는 폭염특보와 폭염 발생 유무에 따른 경우의 수 및 상대비율을 보여준다. Table 4.1.2에서 폭염특보는 주의보와 경보를 구분하지 않고, 특보가 내려진 경우에 대해 주의보 기준인 일최고기온 33℃ 이상 현상이 발생했는지 여부로 결정하였다. 왜냐하면, 33℃ 이상인 날이 이어질 경우 폭염으로 인한 건강 영향이 급증하므로 병원 외래 방문을 손실로 간주한 본 연구에서 주의보와 경보의 구분은 불필요하다고 판단하였다(Jung et al., 2009). 2016년 기상청의 서울지역 폭염특보 정확도는 82.6%, 정밀도와 재현율은 각각 0.605, 0.958, 그리고 F_2-score는 0.8585이다.

Table 4.1.2. 2×2 contingency table for heat wave warning during summer in 2016

		Forecast adverse weather / Protective action	
		Yes	No
Observed adverse weather	Yes	Hit: 23 (h=0.25)	Miss: 1 (m=0.01)
	No	False Alarm: 15 (f=0.16)	Correct Rejection: 53 (r=0.58)

accuracy=$h+r$, precision=$\frac{h}{h+f}$, recall=$\frac{h}{h+m}$, F_2-score=$(1+2^2)\times\frac{(precision\times recall)}{(2^2\times precision)+precision}$

서울시는 2016년 5월 「2016년 폭염 종합대책 추진 계획(이하 '폭염 대책')」을 발표했다. 폭염 대책은 당해연도 6월 1일-9월 30일 동안 서울시와 관계기관 및 민간단체의 협력을 지원 받은 자치구가 실시한다. 주요 활동으로는 폭염정보 전달체계구축, 무더위쉼터 지정·운영, 재난도우미 확보('16년 17,795명), 공공일자리 안전관리대책 운영, 취약계층 방문건강관리 등이다. 서울시는 상황 발생 정도에 따라 평상시/폭염특보시/비상시로 구분하여 임시조직을 가동함으로써 폭염 대책 활동의 효율성을 높이고 있다 (Seoul, 2016).

2016년 서울시의 폭염 대책 예산은 약 86.6억 원이다. 예산은 폭염특보 혹은 현상 발생의 관련성에 따라 고정비와 변동비로 구분하였다. 2016년 폭염 대책 기간 동안 고정비는 약 68억 원, 변동비는 약 18억 원이 집행되었다. 원시자료는 '행정안전부 정보공개 청구'를 통해 서울시에서 제공받았다. 일평균 고정비와 변동비는 각각 폭염 대책 운영 기간과 폭염 발생일수 비율에 따라 계산하였다.

국민건강보험은 전 국민을 대상으로 거의 모든 보건의료기관에서 필요에 따라 보험급여를 지급받을 수 있게 한 사회보장제도이다. 1963년 제정된 「의료보험법」에서 시작하여 1976년 강제성을 전제로 한 당연가입이 개정되는 등 가입자와 의료기관 범위가 지속적으로 확대되어 왔다. 2000년 현재 모습의 국민건강보험이 출범하였고, 우리나라의 국민건강보험 가입자 수는 전 국민의 98%에 달한다(Kim, 2010). 건강보험심사평가원에서 제공 중인 국민건강보험 가입환자(외래/입원)의 건강보험 청구자료(이하 '청구자료')는 대표적인 보건의료 자료로 평가받고 있다. 본 연구에 사용된 2016년 65세 이상 고령자의 청구자료는 '보건의료빅데이터개방시스템'을 통해 제공받았다.

Kim et al. (2013)은 건강보험심사평가원에서 제공하는 청구자료의 내부 타당도를 검증한 결과 100개 다빈도 질환에서 표본자료와 모집단의 비율이 동일하고, 일원분산분석시 95% 신뢰구간에서 표본자료와 모집단 간의 평균과 분산에 차이가 없다고 하였다. 입원환자와 고령환자의 샘플비율은 각각 모집단의 13%, 20%이다. Kim et al. (2013)은 입원환자 청구자료의 모집단 환자 수 추정에 7.692의 가중치를 사용했다. 본 연구에서는 동일한 방법으로 고령환자 청구건수의 모집단 추정에 5의 가중치를 사용했다. 한편, 입원환자 모집단과 표본자료의 환자당 월 평균 청구액의 상대분산은 0.9812이다. 고령환자 표본자료와 모집단의 환자당 월 청구액 상대분산도 거의 유사한 것으로 가정한다.

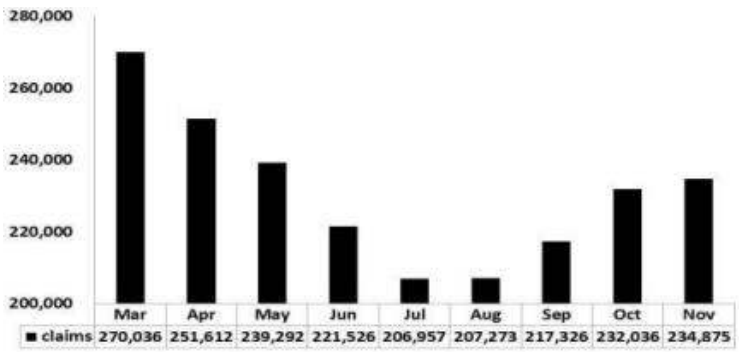


Fig. 4.1.2. Changes in number of health insurance claims in 2016.

2016년 봄~가을(Mar.-Nov.) 동안 총 2,080,933건의 청구자료가 수집되었고, 이들 중 남성은 915,362건, 여성은 1,165,571건이다. Fig. 4.1.2.는 월별 건강보험 청구건 수이다. 건강보험 청구건 수는 신청인 수를 직접 의미하는 것은 아니다. 건강보험 청구 금액은 폭염으로 인한 '손실'로 간주된다. 손실은 다음과 같이 계산되었다.

① T67 계열의 질환에 대한 월별 건강보험 청구금액 합계 분포 도출
② ①의 월별 분포와 상관관계 높은($p \leq 0.05$) 질환들의 월별 건강보험 청구금액 합계 계산
③ 월별 폭염 피해 손실 금액은 ①+②로 계산
④ 모집단의 월별 폭염 피해 손실 금액은 ③×5로 추정
⑤ 일별 폭염 피해 손실 금액은 ④÷92일로 계산

①단계에서 질환별 질병코드는 '질병분류정보센터'의 '한국표준질병·사인분류' 7차 개정안을 참고하였다. T67은 '열 및 빛의 영향'에 의한 질환으로서 열사병 및 일사병, 열실신, 열경련, 열탈진 등을 포함하고 X30 및 E86(이상 ICD-10 코드)과 함께 폭염으로 인한 직접 영향 질환으로 분류된다(Zhang et al. 2012). 2016년 T67 질환의 월별 변화는 Fig. 4.1.3과 같다.

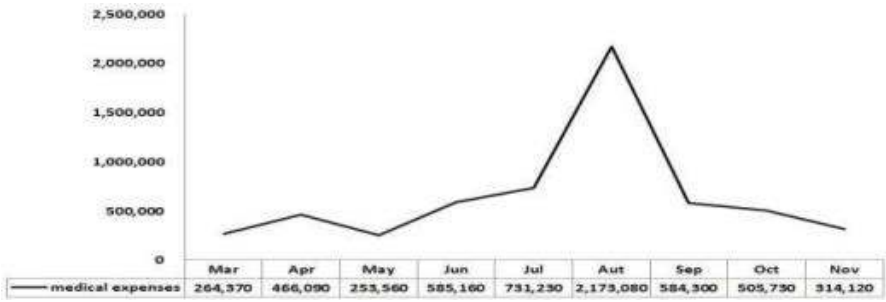


Fig. 4.1.3. Monthly medical expenses from T67 disease in 2016 (unit: KRW).

②단계에서 T67 질환과의 상관분석은 Sarofim et al. (2016)에서 제시된 폭염 관련 간접영향 질환을 대상으로 실시하였다. 해당 질환은 심혈관/뇌혈관/호흡기/신장 질환, 당뇨병, 정신장애, 전해질 불균형이 포함된다. ④단계에서의 상수 5는 고령환자 표본집단의 모집단 추정 가중치이고, ⑤단계의 92일은 여름(Jun.-Aug.)의 총 일수이다.

2. 결과 및 분석

T67질환과 기타 폭염 간접 관련 질환 간의 상관분석 결과 T67계열을 제외하고 25종의 질환이 도출되었다(Table 4.1.3). 도출된 봄~가을의 건강보험 청구금액은 각각 1,190,525,730원, 1,278,389,870원, 1,191,188,500원이다.

Table 4.1.3. Medical expenses of heat related diseases (unit: 10,000 KRW)

diseases	no,	code	Spring			Summer			Fall		
			Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
Hyperkalaemia	1	E875	30,022.59	27,415.47	26,801.07	27,826.12	27,942.06	30,971.40	28,019.22	28,176.97	27,973.22
Mental and behavioural disorders	2	F103	28.09	27.64	27.36	27.86	15.14	76.72	85.71	23.73	14.33
	3	F232	82.30	67.84	54.38	134.59	192.64	216.29	104.12	209.54	96.36

	4	F239	66.03	58.01	61.97	36.70	48.76	104.63	48.21	31.38	75.64
	5	F318	1,415.52	1,102.60	1,237.45	1,206.74	1,366.66	1,831.98	1,042.72	1,184.64	1,358.63
	6	F330	774.96	759.07	690.50	671.13	703.22	846.45	685.36	666.94	697.37
	7	F332	457.35	477.54	363.33	729.88	790.81	776.94	677.36	662.49	611.74
	8	F348	58.35	84.20	63.43	109.98	94.12	124.41	105.14	68.27	58.30
	9	F401	99.04	91.30	55.26	67.00	63.70	135.39	70.60	74.45	72.62
	10	F410	5,321.35	5,146.28	5,821.64	5,326.26	5,024.25	6,382.94	5,525.83	5,401.88	5,277.67
	11	F432	620.22	508.07	577.57	490.81	578.50	689.45	565.09	552.44	494.68
	12	F603	8.69	20.71	3.70	19.78	16.13	31.85	8.96	8.63	8.92
Ischaemic heart diseases	13	I212	51.16	58.03	10.19	65.98	35.98	74.57	46.90	19.57	13.98
	14	I249	260.25	174.76	199.94	302.67	366.20	435.84	437.35	366.63	269.92
Cerebrovascular diseases	15	I601	145.32	153.61	177.17	183.25	239.53	240.87	228.58	174.16	149.36
	16	I604	18.18	6.94	2.18	62.90	3.99	57.50	10.96	1.49	1.93
	17	I6349	74.03	71.41	62.56	64.17	86.42	96.81	56.04	75.75	59.64
	18	I661	283.08	302.96	171.29	127.15	211.98	468.30	69.14	61.76	25.26
	19	I688	1,906.72	1,175.81	1,546.09	1,787.22	1,720.75	2,061.32	1,607.62	1,556.66	1,520.03
Other diseases of upper respiratory tract	20	J341	12.59	103.61	34.22	61.05	43.94	126.00	51.34	20.31	22.86
	21	J351	16.11	13.55	17.89	17.25	11.41	95.45	86.52	48.00	24.75
	22	J382	415.66	336.85	316.37	380.02	483.53	641.40	375.76	224.42	205.96
	23	J3840	74.09	75.05	82.45	97.60	427.63	380.95	158.21	79.08	58.65
	24	J4511	41.94	23.42	36.53	49.08	46.37	63.52	42.99	32.65	37.60
	25	J950	7.78	9.55	13.96	52.11	68.54	79.57	3.46	1.94	12.10
Effects of heat and light	26	T67	26.44	46.61	25.36	58.52	73.12	217.31	58.43	50.57	31.41
sum			42,287.84	38,310.87	38,453.86	39,955.78	40,655.36	47,227.85	40,171.60	39,774.32	39,172.93

Table 4.1.4. Economic value of heat wave warning in 2016 (unit: KRW)

	value
E_f	148,157,205원
E_{nf}	193,083,573원
(daily) EV	44,926,368원
(summer) EV	4,133,225,870원

폭염특보의 경제적 가치는 44,926,368원으로 평가되었다. 92일(6-8월) 동안 누적되는 폭염특보의 경제적 가치는 4,133,225,870원으로 추정할 수 있다. 이는 서울시가 소요한 폭염대책 예산 86.6억 원의 47.73%에 해당하며, 폭염대비 예산 중 '그늘막, 쿨루프, 안개시스템 설치'와 '무더위쉼터 냉방비 등 운영비'를 합한 것보다 큰 금액이다. 그리고 2016 회계연도 당시 기상청 지출예산인 396,151,955,540원의 약 1.04%에 해당한다. Ebi et al. (2004)은 Smith et al. (2001)과 Krupnick et al. (2002)의 결과를 통해 1995-1998년 동안 필라델피아에 거주하는 65세 이상 고령자의 개인 VSL (Value of a Statistical

Life)을 400만 달러로 가정하고, 3년 동안 PWWS (Philadelphia Hot Weather-Health Watch/Warning System)의 가치를 4억 6,800만 달러로 추정했다. 해당 금액은 연평균 1억 5,600만 달러의 가치로 물가상승률을 무시한 단순 환율 변환시 1,835억 원으로 본 연구에서 평가한 폭염특보 가치의 약 44배에 달한다. 이러한 차이는 일차적으로 폭염 피해 감소를 위해 응답자에게 지불 가능한 금액(Willingness To Pay; WTP)을 설문하는 방법과 실제 비용-손실을 고려한 의사결정 과정을 분석한 방법론에서 기인한다. 또는 필라델피아와 서울의 폭염 발생 빈도 및 강도 혹은 시민들의 고온에 대한 적응력 등도 고려될 수 있다. 어떤 이유에서든 본 연구에서 제시된 폭염특보의 가치가 극히 일부분을 반영하는 것임을 보여주는 결과이기도 하다. 하지만, 본 연구 결과의 장점은 실제 데이터를 활용하여 비교적 구체적인 가치를 분석하고자 시도한 것이다. 향후 다양한 분야, 분석 연령의 확장을 통한 추가분석으로 폭염특보의 정확한 가치를 평가하는 작업이 지속적으로 요구된다고 할 수 있다.

한편, False Alarm 오류를 한 번 줄일 때마다 매일 832,880원, 여름 동안 76,624,960원의 추가적인 가치가 향상된다. 100% 정확도 달성시 여름철 총 예보가치는 5,210,500,040원으로 평가되었다. 이는 현재 수준의 폭염특보가 완전해질 경우 23.98%의 가치가 상승할 수 있음을 의미한다.

마지막으로 서울시가 사용한 폭염대책 예산은 서울 시민 전체를 위한 것으로 예산 총액을 시민 수(9,930,616명)로 나누면 872.09원이다. 이는 시민 1인당 폭염 대책을 위해 지불된 금액으로 간주될 수 있다. 그런데, 65세 이상 고령자를 고려한 폭염 가치는 약 41.3억 원으로 이를 서울시의 65세 이상 인구수(1,229,365명)로 나눌 경우 3,362.08원이 된다. 서울에 거주하는 65세 이상 고령자들은 본인이 부담한 폭염 대책 예산의 3.86배 금액을 기상청의 폭염특보 서비스로 제공받은 것이다.

제 2 절 국립기상과학원 연구개발의 경제적 가치 추정

1. 평가대상

국립기상과학원에서는 기상청에서 제공하는 서비스 개선을 위해 각종 관측장비 운영 및 활용 개선을 위한 연구와 예측모델 개선을 위한 연구를 진행하고 있다. 본 연구에서는 국립기상과학원에서 진행하고 있는 주요 연구인 기상항공기 및 모바일기상관측

차량 활용 개선 및 황사·연무통합예측모델, 지역 파랑예측모델, 기후예측모델의 예측정확도 개선에 대한 비시장적 편익을 추정하고자한다.

(1) 기상항공기

국립기상과학원은 2018년 기상항공기를 도입하여 운영하고 있다. 기상항공기에는 구름물리 관측장비, 에어로졸-온실가스 관측장비, 위험기상 선행관측장비 등 25개 기상관측장비가 장착되어있으며, 봄철에 특히 많이 발생하는 황사·연무 관측, 관측 공백지역 및 대기 상층 입체관측 등을 위해 활용되고 있다. NOAA는 2019년 현재 무인기를 포함한 총 9대의 기상항공기를 운영 중이며, 운영중인 기상항공기를 이용하여 연간 400시간의 기상관측을 기록하고 있다. 현재 국립기상과학원이 기상항공기를 활용하여 관측을 수행하는 시간은 연간 352시간 수준으로, NOAA의 약 88% 수준이다. 기상항공기 활용시간 증가는 새로운 기상관측정보를 생산하고, 이를 통한 예보 모델 개선 등에 도움을 줄 것으로 기대된다. 또한 인공강우 실험, 방사능 관측, 평창 동계올림픽과 같은 국가적 주요 행사 등에 활용 가능하다.

(2) 모바일기상관측차량

복잡한 도심지역과 산악지형 등 기존의 관측장비의 설치 및 사용이 어려운 지역에서 활용 가능한 모바일기상관측차량은 국지성 호우, 태풍, 대설 등 위험기상현상을 감시하고 실시간 추적관측에 사용된다. 국립기상과학원은 현재 총 4대의 모바일기상관측차량을 운영중이며, 2018년 평창 동계올림픽 기상관측 지원, 2019년 4월 강원도 산불 현장 인근지역 풍향·풍속 관측자료 실시간 제공, 여름철 도심지역 폭염 대비 도로기상관측 등에 활용된 바 있다. 기상재해 발생시 모바일기상관측차량의 활용률은 72% 수준이며, 활용률이 증가하면 위험기상 발생시 선제적 목표관측이 가능해질 것으로 예상된다.

(3) 황사·연무통합예측모델

봄철 발생이 잦은 황사와 대기오염으로 인해 발생하는 연무는 호흡기, 안과, 피부질환 등 건강뿐만 아니라 여가생활, 야외활동 등에 지장을 주고, 반도체, 조선, 자동차, 항공 등 여러 산업과 농업에 피해를 야기한다. 특히 최근 들어 황사·연무의 발생이 계

절과 상관없이 발생하고 있어 이에 대응할 수 있는 대책 마련이 시급하다. 황사·연무 예측은 기상위성자료, 지상관측자료 등을 황사·연무통합예측모델에 적용하여 슈퍼컴퓨터를 이용하여 계산한 후 기상청 예보관의 최종 판단을 거쳐 한국환경공단에서 서비스하고 있다. 현재는 황사 농도에 따라 '보통', '약간 나쁨', '나쁨', '매우 나쁨'으로 구분하여 서비스하고 있으며, 황사·연무통합예측모델의 예측정확도가 향상되면 단계 세분화 및 단계별 영향예보가 가능할 것으로 기대된다.

(4) 지역파랑예측모델

예상치 못한 높은 파도와 너울은 사고를 유발하고 인명 및 재산 피해를 야기할 뿐만 아니라 어업, 물류업, 해양 레저업 등 여러 산업에도 영향을 미친다. 기상청에서는 파랑예보 서비스를 제공하고 있으며, 국립기상과학원에서는 예보의 정확도 향상을 위해 예측모델 개선 연구를 진행중이다. 파랑예측모델은 전지구, 지역, 연안모델이 있으며, 모델별 해상도는 각각 55㎞, 8㎞, 1㎞와 예측 시간은 288시간, 87시간, 72시간이다. 본 연구에서는 지역 파랑예측모델의 예측정확도를 평가대상으로 한다. 지역 파랑예측모델은 한반도 주변 및 일본 주변바다까지 포함하며, 5일 후까지 파랑예측이 가능하다. 지역 파랑예측모델의 예측정확도가 향상되면, 해상에서 발생하는 인명사고 예방 및 어선, 화물선 등의 사고 예방에 도움을 줄 수 있다.

(5) 기후예측모델

기후예측모델을 이용한 1개월, 3개월 뒤의 강수 및 기온 예측은 계절예보라고 하며, 제조·물류·유통업 등에서 판매량 예측, 농업에서 식물의 파종·수확시기 결정, 어업에서 어획량·어종 예측 등에 사용된다. 또한 계절별 강수량 예측을 통해 한 계절 앞서 기상재해에 대비하고, 여름철 폭염, 겨울철 혹한 등 평년과의 비교를 통해 대비가 가능하다. 예측정확도 개선을 통해 생산되는 더욱 정확한 계절예보는 이를 사용하는 각종 산업부문의 비용절감, 생산량 증가 등에 도움을 줄 뿐만 아니라 기상재해 대비에도 도움이 될 수 있다.

2. 선행연구

시장재화의 경제적 가치 추정을 위해서 주로 사용되는 방법으로 조건부가치측정법과 컨조인트 분석법이 있다. 특히 복잡한 속성을 가진 비시장재화의 종합적 평가에는 컨조인트 분석법이 효과적이기 때문에 많은 분야에서 활용되고 있다. Kim and Lee (2015)는 부산김해경전철의 선택가치를 컨조인트분석법을 이용하여 추정하였다. 연구에서는 사용자 그룹과 비사용자 그룹으로 나누어 환승요금 인하, 유류세 인상, 대중교통 보조금을 속성으로 하여 연구를 진행하였으며, 각각의 속성별 사용자 그룹의 한계지불의사액(MWTP, Marginal Willingness to Pay)은 2,651원, 909원, 5,462원으로, 비사용자 그룹의 한계지불의사액은 2,029원, 1,394원, 6,870원으로 추정되었다. Shin et al. (2016)은 문화 생태계서비스의 가치를 컨조인트 분석법을 이용하여 추정하였다. 심미적 서비스, 휴양서비스, 문화유산서비스, 영적·종교적서비스, 교육서비스를 속성으로 하였으며, 연구지역은 가리왕산을 중심으로 반경 10㎞ 내에 위치한 강원도 평창군과 정선군 소재 5개면, 9개리로 지정하였다. 연구지역 내 주민과 방문객을 대상으로 연구를 진행한 결과 지역주민은 심미적서비스와 휴양서비스의 수준 개선에 대해 음(-)의 값, 즉, 비선호응답을 보여 연구의 대상지역의 산림생태계의 이용형태에 따라 세부 서비스들의 인지가 다름을 확인했다. Park and Song (2018)은 지역공원의 관광자원 가치 추정을 위해 컨조인트 분석법을 활용했다. 공원조성 수준, 다양한 활동 제공, 편의 정도를 속성으로 하여 추정한 한계지불의사액은 각각 18,261원, 13,964원, 12,683원으로 추정되었다.

기상예보서비스 또는 기상정보의 경제적 가치를 컨조인트 분석법 또는 조건부가치측정법을 이용하여 추정한 연구는 이전에도 수행된 바 있다. NOAA는 조건부가치측정법을 통해 미국의 가구들을 대상으로 기상예보 개선의 경제적 가치를 추정한 바 있다 (Lazo and Chestnut, 2002). 연구결과 미국의 연간 가구당 현재의 기상예보에 부여하는 가치는 109달러로 추정되었다. 또한 연구에서는 단기 기상예보의 질을 최대치로 개선하는데 대한 응답자의 지불의사액을 추정하였는데, 그 결과 가구당 연간 지불의사액은 16달러로 추정되었다. Lee et al. (2014)은 예보지역규모, 예보주기, 정보타입, 예보기간, 전달매체, 예보정확도를 속성으로 꽃가루 예측 시스템의 경제적 가치를 선택실험법을 이용하여 추정하였다. 전달매체에 대한 추정치는 통계적으로 유의하지 않은 것

으로 나타났으며, 1% 유의수준에서 통계적으로 유의한 것으로 나타난 나머지 각각의 속성에 대한 연간 가구당 지불의사액은 USD 1.60, 0.20, 1.18, 0.71, 0.13인 것으로 추정되었다. Park and Yoo (2017)는 선택실험법을 이용하여 기상예보시스템 개선의 가계부문 경제적 편익을 분석한 바 있다. 연구진은 기상서비스의 속성을 단기예보 갱신주기, 중기예보 갱신주기, 단기예보 정확도, 중기예보 정확도로 구분하였으며, 속성별 한 단위 개선에 대한 경제적 가치는 각각 월간 가구당 499.3원, 108.3원, 346.5원, 80.9원으로 추정되었다. Yoo et al. (2011)은 기상서비스 개선의 경제적 가치를 조건부가치측정법을 이용하여 추정하였으며, 그 결과 월간 가구당 지불의사액은 530.7원으로 조사되었으며, 추가적으로 가구당 기상서비스 제공을 위해 매월 지불하고 있는 금액인 1,171원과 연구결과로 얻어진 530.7원을 더해 기상서비스의 경제적 가치를 월간 가구당 1,701.7원으로 추정한 바 있다

3. 방법론

KDI (2012)는 과학시설 등의 경제적 편익 추정에 진술선호 접근법 적용을 제안하고 있다. 또한 KISTEP (2016)도 비시장재화의 경우 진술선호 접근법 적용을 제안하고 있으며, 비시장재의 경제적가치 추정을 위해 널리 사용되고 있는 진술선호 접근법은 크게 조건부 가치측정법(CVM, Contingent Valuation Method)과 컨조인트 분석법으로 나눌 수 있다. CVM은 경제적가치 추정 대상의 단일 속성에 대한 지불의사액 추정만이 가능하지만, 컨조인트 분석은 다양한 속성과 수준의 조합으로 구성된 대안에 대하여 응답자의 선호를 조사하기 때문에 여러 속성에 대한 지불의사액 추정이 가능하다 (Kwak et al., 2006; Jin et al., 2014). Cho et al. (2011)은 도시기상정보서비스의 경제적 편익을 CVM을 이용하여 추정하였으며, 응답자의 평균 지불의사액 추정 결과 향후 5년간 연간 가구당 5,962원의 지불의사가 있음을 확인했다. Cho et al. (2011)은 연구진행 당시 제공되던 동네기상정보시스템과 개선된 도시기상재해정보시스템의 차이점을 상세하게 설명하고, 응답자들이 지불의사액을 답하도록 하였는데, CVM을 이용할 경우, 개선되는 여러 가지 차이점 중 요인별 선호도는 추정이 불가능하다. 반면, 본 연구에서는 그 속성이 다양하게 구성되어있기 때문에 컨조인트 분석법을 적용하여 경제적 가치를 추정하는 것이 적절하다. 이에 국립기상과학원의 주요연구인 관측장비 운영 및

예측모델 정확도 개선의 경제적가치를 추정하기 위해 컨조인트 분석법을 적용한다.

컨조인트 분석법은 Louviere (1988)에 의해 개발되었다. 이후 마케팅, 교통, 심리학 분야에 의해 널리 적용되었고, Admowicz et al. (1994)에 의해 비시장재화의 가치측정 분야에 처음 적용된 이후 다양한 분야에서 활용되고 있다(Jin et al., 2014).

(1) 속성 및 수준

컨조인트 분석을 위해서 중요한 것은 연구목적에 맞는 속성파악이다. 본 연구에서는 국립기상과학원에서 수행하고 있는 연구의 경제적 가치 추정을 위해 주요 연구와 그 속성 및 수준을 각 연구를 담당하고 있는 전문가의 자문을 통해 결정하였다. 국립기상과학원의 주요 연구로는 기상항공기와 모바일기상관측차량 운영 및 활용 개선, 황사·연무통합예측모델, 지역파랑예측모델, 기후예측모델의 운영과 예측정확도 개선 등이 있다. 주요 연구별로 다양한 특성을 가지므로 각 연구의 담당 전문가들과 함께 연구의 특성을 반영할 수 있는 속성을 선정하고, 측정 가능한 개념으로 정의하는 것이 중요하다. 설문을 구성할 때 중요한 점은 속성과 속성별 수준에 대해 응답자들이 충분히 인지할 수 있어야 하고, 속성 및 수준별로 명확히 구분되어야하며, 응답자들이 인식하기에 중요한 속성이어야 한다(Lee et al., 2016). 본 연구에서 설정한 속성들은 일상생활에서 접하기 어렵기 때문에, 속성의 수준을 응답자들이 이해하기 쉽게 간단히 설정하였다. 또한 간단한 그림과 사진을 포함한 보기카드를 제작하여 설문에 활용하였다.

Table 4.2.1. Attributes and levels of improvement of observation systems use and prediction model accuracy

Attributes	Descriptions	Level
NIMS Atmospheric Research Aircraft (NARA)	Observation time per year using NARA	level1: Not perform(352h yr^{-1}) level2: 370 h yr^{-1} level3: 400 h yr^{-1}
Mobile Observation VEhicle (MOVE)	Utilization rate of MOVE when disaster happened	level1: Not perform(72%) level2: 77% level3: 92%
Asian Dust Aerosol Model Version 3 (ADAM3)	Improvement rate of asian dust aerosol forecast accuracy	level1: Not perform level2: 10% level3: 30%
Regional ocean wave prediction system	Improvement rate of wave predict accuracy	level1: Not perform level2: 10% level3: 30%
Global Seasonal Forecasting Model (GloSea5)	Improvement rate of seasonal climate forecast accuracy	level1: Not perform level2: 10% level3: 30%
Price	Willingness to pay for improving attributes (KRW, per year)	level1: 0 level2: 500 level3: 1,500 level4: 3,000 level5: 5,000

(2) 선택대안집합의 설계

전문가들과의 회의를 통해 결정된 속성 및 수준은 선택대안을 선택하는 행위로부터 개별속성의 효과를 분리하는 것에 효과적인 주효과 직교설계를 통해 현시선호 확률효용모형의 단점을 개선한다(Kim et al., 2016). 컨조인트 분석을 위한 설문지 및 설문응답자가 제시받을 컨조인트 카드는 기준 상태를 나타내는 대안 한 개와 관측장비 운

영 및 예측모델 정확도 개선의 다양한 속성 수준으로 정의된 두 개의 대안으로 구성된다. 선택 대안집합을 구성하기 위해서 개별 속성수준과 가격 속성수준을 결합하면 총 $3^2 \times 3^2 \times 3^2 \times 3^2 \times 3^2 \times 5^2$개의 선택대안을 구할 수 있지만, 그 수가 너무 많아서 응답자들이 모두 답변하는 것이 불가능하므로, 최소 선택대안집합을 도출해야한다. 이에 본 연구에서는 SPSS 20 프로그램을 사용하여 주효과 직교설계를 수행하였으며, 한 블록에 4개의 질문이 포함되도록 임의표본추출을 통해 8개의 블록으로 배분하였다.

	Alternative A	Alternative B	Do nothing
● Utilization of NARA[1)]	370 h yr^{-1}	370 h yr^{-1}	352 h yr^{-1}
● Utilization rate of MOVE[2)]	77%	92%	72%
● Accuracy of ADAM3[3)]	X	X	X
● Accuracy of regional ocean prediction model	X	10%	X
● Accuracy of Glosea5[4)]	10%	10%	X
● WTP (KRW, per year)	500	5,000	0
	□	□	□

1) NIMS (National Institute of Meteorological Sciences) Atmospheric Research Aircraft
2) Mobile Observation VEhicle
3) Asian Dust Aerosol Model Version 3
4) Global Seasonal Forecasting Model 5

Fig. 4.2.1. An example of a set of alternatives.

(3) 표본설계 및 설문

본 연구에서 지정한 주제와 속성 및 수준이 일반인들에게는 친숙하지 않아 설문 응답에 어려움을 느낄 수 있으므로, 설문을 진행할 조사원의 교육과 설문 시뮬레이션 등을 통해 응답자들이 충분히 그 내용을 숙지하고 설문에 응답할 수 있도록 하였으며, 설문지와 함께 그림 등이 포함된 보기카드를 제작하여 응답자들의 이해를 도왔다. 2019년 11월 한 달간 전문조사기관을 통해 설문조사를 수행하였다. 설문은 제주도를 제외한 전국에서 무작위로 추출된 1,000가구의 만 20세 이상 65세 이하의 세대주 또는 세대주의 배우자를 대상으로 진행하였으며, 설문의 내용과 다양한 속성 및 수준 등을 응답자들에게 정확히 이해시키기 위해 일대일 개별면접 방식을 채택하였다.

4. 추정모형

컨조인트 분석을 위한 기본 모형은 확률모형을 이용하여 정형화가 가능하며, MacFadden (1973)이 개발한 다항로짓모형을 통해 개별속성들이 응답자의 선택확률에 어떻게 영향을 주는지 계량경제학적 체계로 모형화 할 수 있다. 이 때 'A 또는 B를 선택할 확률은 C라는 대안의 존재여부에 영향을 받지 않는다.(Hausman and Macfadden, 1984)'는 '비관련 대안의 독립성(independence of irrelevant alternatives, IIA)'을 따른다고 가정한다. IIA 가정의 위배를 피하기 위한 방법으로 McFadden (1978)은 다른 그룹에 포함된 오차항 간의 상관관계 또는 중첩로짓(nested logit)모형을 제시한 바 있다. 중첩로짓 모형에서 i번째 응답자가 현재 상태를 포함한 선택대안으로 구성된 m번째 계층에서 j번째 대안을 선택할 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{ijm} = P_i(j|m) \cdot P_i(m) \qquad \text{Eq. 4.2.1}$$

Eq. 4.2.1의 $P_i(j|m)$은 i번째 응답자가 m번째 계층에서 선택대안 j를 선택할 확률이다. $P_i(m)$은 i번째 응답자가 m번째 계층을 선택할 확률이며, 응답자의 효용 함수에서 오차항이 일반적인 극한값 분포를 따른다고 가정하면 그 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{ijm} = \frac{\exp(D_{jm}/\alpha)[\sum_{l=1}^{J_m}\exp(D_{lm}/\alpha)]^{(\alpha-1)}}{\sum_{k=1}^{M}[\sum_{l=1}^{J_m}\exp(D_{lk}/\alpha)]^{\alpha}} \qquad \text{Eq. 4.2.2}$$

α는 내포치(inclusive value)이며, $\alpha=1$일 때 확률은 Eq. 4.2.2와 같고, 다항로짓모형이 된다. $\alpha \neq 1$일 때는 중첩로짓모형이 되기 때문에 비관련 대안의 독립성 가정의 성립여부 판단을 위해서는 $\alpha=1$이라는 귀무가설의 검정이 필요하다.

관측가능한 부분인 D_{ij}는 속성벡터 H를 포함한 다음과 같은 선형함수로 표현 가능하다.

$$D_{ij} = ASC_i + \beta_1 H_{1,ij} + \beta_2 H_{2,ij} + \beta_3 H_{3,ij} + \beta_4 H_{4,ij} + \beta_5 H_{5,ij} + \beta_6 H_{6,ij} \quad \text{Eq. 4.2.3}$$

Eq. 4.2.3의 ASC_i는 대안 A와 B를 나타내는 대안특화상수(alternative-specific constant)로서 여러 속성을 통해서 반영되지 않는 특정대안의 효용을 나타내는 역할을 한다. 또한 Eq. 4.2.3의 속성벡터 H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6은 각각 '기상항공기 활용시간개선', '모바일 기상관측차량 활용률 개선', '황사 농도 예측 정확도 향상', '파고 예측 정확도 향상', '기후 예측 정확도 향상', '가격'을 나타낸다. β_1부터 β_6은 개별 속성에 대한 추정계수로서 이는 응답자의 효용에 영향을 미친다. 개별 편익 속성 변수들의 '현재 수준에서 한 단위 증가에 대한 한계지불의사액'은 Eq. 4.2.3을 전미분하여 구할 수 있다. Eq. 4.2.4는 가격의 변화와 각각의 속성간 한계대체율(marginal rate of substitution)을 나타낸다.

$$\begin{aligned} MWTP_{H_1} &= dH_6/dH_1 = -\beta_1/\beta_6 \\ MWTP_{H_2} &= dH_6/dH_2 = -\beta_2/\beta_6 \\ MWTP_{H_3} &= dH_6/dH_3 = -\beta_3/\beta_6 \\ MWTP_{H_4} &= dH_6/dH_4 = -\beta_4/\beta_6 \\ MWTP_{H_5} &= dH_6/dH_5 = -\beta_5/\beta_6 \end{aligned} \quad \text{Eq. 4.2.4}$$

5. 분석결과

(1) 추정결과

전문적인 설문조사기관의 숙련된 조사원들의 면접조사를 통해 총 1,000명의 응답자에게서 4,000개의 이용 가능한 자료를 얻어 분석을 진행 하였다. 분석을 통한 추정결과는 Table 4.2.2와 같다. '모바일기상관측차량 활용 개선'은 유의수준 5%에서, 이을 제외한 모든 속성의 추정계수는 유의수준 1%에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 기상항공기 활용 개선, 모바일기상관측차량 활용 개선, 황사·연무통합예측모델 예측정확도 개선, 지역 파랑예측모델 예측정확도 개선, 기후예측모델 예측정확도 개선 모두

의 추정계수는 양(+)의 부호를 갖는 것으로 나타났으며, 이는 각 속성의 수준이 증가할수록 응답자의 효용이 증가한다고 해석할 수 있다. 반면, 가격의 추정계수가 음(-)의 부호를 갖는 것은 가격 상승이 응답자의 효용을 감소시킨다는 것을 의미한다. 추정된 계수들의 통계적 유의성과 부호를 통해 설문조사가 성공적으로 수행되었음을 확인할 수 있다. 즉, 응답자들이 설문조사에서 제시된 가상적 상황 설정을 충분히 이해하고 응답한 것으로 판단된다.

Table 4.2.2. Estimation results of the nested logit model

Variables	Estimates	*t*-value
ASC	-2.2352	-8.82**
NARA[1] utilization	0.7953	6.94**
MOVE[2] utilization	0.7146	1.93*
ADAM[3] accuracy	1.1182	5.80**
Regional ocean wave prediction system accuracy	0.4168	2.48**
GloSea5[4] accuracy	0.4006	3.25**
Price	-0.2326	-8.49**
Number of bservation	4,000	
log-likelihood	-3,652.35	
Wald statistic(*p*-value)	-0.6440(0.000)**	

1) NIMS (National Institute of Meteorological Sciences) Atmospheric Research Aircraft
2) Mobile Observation VEhicle
3) Asian Dust Aerosol Model Version 3
4) Global Seasonal Forecasting Model 5
*, ** indicate statistical significance at 5%, 1% level

한편 통계적 유의도를 살펴보기 위해 '모든 추정계수는 0이다'라는 귀무가설을 설정하면 다음과 같은 Wald-통계량을 구할 수 있다.

$$W = \hat{\delta}[\hat{V}(\hat{\delta})]^{-1}(\hat{\delta}) \qquad \text{Eq. 4.2.5}$$

여기서 δ는 추정계수벡터이고, $\hat{V}(\hat{\delta})$는 δ의 분산에 대한 추정치이다. 검정통계량 W는 모든 추정계수가 0이라는 귀무가설이 유의수준 1%에서 기각되어 추정된 방정식은

통계적으로 유의함을 알 수 있다.

(2) 모형검정

비관련대안의 독립성 가정 성립 여부 검정을 위해 우도비(likelihood ratio) 검정과 t-검정을 수행한 결과 그 값이 각각 -0.64와 -15.23으로 유의수준 1%에서 통계적으로 유의하였다. 이는 제약이 가해진 우도함수와 제약이 가해지지 않은 우도함수 간 차이가 없다는 귀무가설을 검정하는 것(Kim et al., 2016)으로서 검정 결과에 따르면 두 검정 모두 귀무가설이 기각되어 다항로짓모형보다 중첩로짓모형을 이용하여 예측모델 정확도 및 관측장비 운영 개선의 속성별 한계지불의사액을 추정하는 것이 더 적절하다. 따라서 본 연구에서는 중첩로짓모형의 추정결과만을 다루고자 한다.

(3) 속성별 한계지불의사액

예측모델 정확도 및 관측장비 운영 개선의 속성별 한계지불의사액 추정 결과는 Table 4.2.3과 같다. 한계지불의사액은 각각의 속성 수준을 한 단위 개선하는 것에 대한 가구당 연간 지불의사액을 의미한다. 기상항공기 활용이 1시간 개선되는것에 대한 연간 한계지불의사액은 34원, 모바일 기상관측차량 활용이 1%p 상승하는것에 대한 연간 한계지불의사액은 30원, 황사·연무통합예측모델 예측정확도가 1%p 상승하는데 대한 연간 한계지불의사액은 48원, 지역 파랑예측모델 예측정확도 1%p 개선에 대한 연간 한계지불의사액은 18원, 기후예측모델 예측정확도 1%p 상승에 대한 한계지불의사액은 17원으로 나타났으며, 각각의 속성들에 대한 한계지불의사액 값들은 모두 유의수준 5%에서 통계적으로 유의했으며, 응답자들은 황사·연무 통합예측모델의 예측정확도 개선에 가장 높은 가치를 부여했다. 또한, 추정된 한계지불의사액에 대한 95% 신뢰구간을 Krinsky and Robb (1986)이 제안한 몬테칼로 모의실험 기법을 적용하여 계산하였으며, 이를 통해 점 추정치 추정의 불확실성을 반영했다. 계산된 값은 Table 4.2.3에 제시하였다.

Table 4.2.3. Estimation results of MWTP

Variables	MWTP(KRW, per household, per year)	
	Estimates(t-value)	95% confidence interval
NARA[1] utilization	34(6.42)**	24.4~46.2
MOVE[2] utilization	31(1.86)*	0.4~65.9
ADAM[3] accuracy	48(4.51)**	29.8~72.5
Regional ocean wave prediction system accuracy	18(2.35)**	3.4~33.9
GloSea5[4] accuracy	17(3.87)**	7.7~26.0

1) NIMS (National Institute of Meteorological Sciences) Atmospheric Research Aircraft

2) Mobile Observation VEhicle

3) Asian Dust Aerosol Model Version 3

4) Global Seasonal Forecasting Model 5

*, ** indicate statistical significance at 5%, 1% level

제 5 장 요약 및 결론

「기상정보활용 및 가치창출 지원 연구」는 수요자 관점에서의 기상정보에 대한 효율적 활용과 가치창출 지원을 목표로 수행되었다. 주요 연구내용은 기상기후 관련 기상기술·정책 정보 동향 조사·분석 및 개발, 다학제 융합기반 기술 연구, 정책전략 개발 및 기획 연구이고, 결과는 다음과 같다.

첫째, 기상기술·정책 정보 동향 조사·분석에서는 2019년 한 해 동안 총 206건, 24회의 정보 동향을 제공하였다. 월 평균 약 17건에 달하며, 조사된 정보들을 7개 분야로 분류한 결과 기상기술·정책 전략 분야가 34%로 가장 많은 비중을 차지하였고, 그 다음으로 기후분야 21%, 위험기상/재해분야와 응용기상분야가 각각 14%, 관측/장비분야 9%, 해양분야 5%, 환경기상분야 3% 순으로 조사되었다. 2018년이 전지구적으로 폭염, 가뭄, 폭우, 홍수, 태풍, 산불, 지진, 화산분화 등 극한기상현상과 재해가 빈번하게 발생한 한 해였다면, 2019년은 그에 대한 대응, 피해 완화를 위한 정책 전략 마련, 기술개발 등과 관련한 이슈가 주를 이루었다. 이에 외국 기상청의 기술·정책 발표 등과 관련된 정보 동향이 다수 수집되었고, AI, 드론 등 새로운 기술 활용과 관련된 정보 동향도 다수 조사 되었다. 기후변화 예측, 대응 관련 보고서가 여러 연구기관 및 정책기관 등에서 발간되었으며, 기술개발 및 연구개발을 위해 다양한 국제연구팀이 활약하기도 했다. 새로운 관측기기 활용 및 모델개발을 통한 예측정확도 개선, 기상재해 발생시 정보전달 방법 다변화 등을 통해 더욱 극심해지는 극한기상현상에 대비하는 각국의 정보 동향과 함께, 지구 온난화의 심화, 기후변화 가속화, 해수온도 상승 가속화 등과 같은 현재 상태와 미래 상황을 경계하는 연구 결과도 발표되었다. 2019년 조사·분석된 기상기술·정책 정보 동향은 기후변화의 속도를 늦추기 위한 노력보다는 변화하는 기후와 그로 인해 발생하는 극한기상현상 대응과 관련된 연구 및 뉴스가 주를 이루었다. 또한 주기적으로 제기되고 있는 것 중 하나는 기후변화 대응을 위한 국제 협업과 여러분야 전문가들이 참여하는 공동연구의 중요성이다. 또한 개발도상국의 극한기상현상 피해 대응 지원 및 영향 완화 등을 위한 선진국의 노력이 지속적으로 요구된다. 우리나라를 비롯하여 주변국의 기후변화영향 및 기술·정책 동향을 파악하는 것뿐만 아니라 기상선진국들을 포함하여 전세계의 관련 동향 파악은 필수적으로 요구된다. 이를 위해

본 기상기술·정책 정보 동향은 향후에도 지속적으로 이루어져야 할 것이며, 본 보고서에 기술한 내용이 향후 관련 산업 및 연구, 학계에 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

둘째, 다학제 융합기반 기술 연구에서는 겨울철 한파에 따른 6대도시 질환별 초과사망률 분석(1991-2015), 여름철 야외 노동자의 열스트레스 현황과 적정 휴식시간 분석 연구가 수행되었다.

먼저, 한파에 따른 6대도시 질환별 초과사망률 분석(1991-2015)을 수행하였다. 겨울철 사망률은 여름철보다 계절성에 따른 사망률이 더 높으며, 고령화에 따른 인구 부양률의 큰 증가로 최근에 국민의 보건기상 취약성이 증가하고 있다. 분석 결과, 모든 지역에서 강한 한파 6일 후에 초과사망률이 최고값을 나타내었다. 특히, 모든 질병(13.8%, 95%CI: 7.0), 심뇌혈관 고령자(10.0%, 95%CI: 6.7), 호흡기 고령자(11.8%, 95%CI: 7.3)에서 6일 후 최고 사망률이 관찰되었다. 이 결과는 DP+보다 기저질환이 있는 65세 이상 고령자 사망률이 DP++ 이후에 더욱 높고 건강영향이 지속적임을 보여주는 결과이다. 이는 한파 강도, 연령, 시간지연효과(Time lag)의 부분적 기여를 나타낸 것으로, 향후 지역별, 질환별 상세분석의 필요성을 제시한다.

고열 작업환경에서 적절한 휴식시간은 노동자의 열스트레스 회복에 도움이 되며 열 관련 질병의 위험을 감소시킬 수 있다(Morioka et al., 2006). 고열작업환경 지침(KOSHA, 2017)에서는 고열환경과 관련된 산업재해를 저감하고자 WBGT지수에 기반하여 노동자가 열스트레스에 노출되는 환경 하에서 작업-휴식 스케줄을 규정하고 있다. 이를 활용하면 단순히 조금 더 길게, 자주 휴식을 취하라는 추상적인 권고사항이 아닌, 야외 노동자가 처한 열환경에 대한 파악과 정량적인 휴식시간의 제시가 가능하다. 본 연구에서는 노동자의 온열질환 예방을 위해 사용되는 WBGT지수를 활용하여 최근 10년간의 열스트레스 환경을 분석하고 안전한 작업을 위해 요구되는 적정 휴식시간을 정량적으로 산출하였다. 우리나라의 여름철 WBGT지수 분석에 따르면, 가장 더운 시간대인 11:00-15:00에 곡괭이질 또는 삽질과 같은 중작업을 수행하는 노동자의 신체에 열스트레스가 가해질 것으로 분석되었다. 특히, 최근 지속되는 온난화로 인해 2018년과 같은 해에는 물체를 들거나 밀면서 걸어 다니는 수준의 중등작업을 수행하는 노동자들 역시 야외 작업시간의 약 42%에 달하는 시간동안 열스트레스를 겪을 수 있는 것으로 나타났다. 노동자의 지속적인 열 노출은 노동자들의 건강과 복지에 잠재적으로 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Kjellstrom et al., 2014). 노동자의 온열질환 예

방을 위해 매시간 요구되는 적정 휴식시간을 분석한 결과, 여름철 평균적으로 중등작업에서 5.3분 중작업에서 10.6분 수준의 휴식시간이 필요한 것으로 분석되었다. 그러나 여름철 성하기 매시간 요구되는 휴식시간은 중등작업 수준에서 평균 12.1분, 중작업 수준에서 평균 20.7분까지 증가하여 해당 시기 노동자의 온열질환 예방을 위한 지속적인 관심과 규칙적인 휴식시간 배분 계획 등의 대책마련이 필요할 것으로 판단되었다.

셋째, 정책전략 개발 및 기획 연구의 일환으로 먼저 폭염특보 정보의 경제적 가치를 평가했다. 분석을 위해 예보 정보를 사용하여 폭염에 대비하는 서울시의 예산과 65세 이상 고령자들의 폭염 관련 질환으로 인한 건강보험 청구금액을 수집하였다. 서울시 폭염대책 예산은 고정비와 변동비로 구분하였고, 건강보험 청구금액에서 폭염 관련 질환을 추출하기 위해 T67 질환과 상관분석을 실시하여 95% 신뢰수준에서 유의미한 질환을 선정하였다. 예보 정보 미사용시 서울시는 매일 대비행동을 실시하는 것으로 가정하였다. 2016년 기상청 폭염특보는 매일 44,926,368원, 6-8월 여름 동안 4,133,225,870원의 가치를 서울시에 제공한 것으로 평가되었다. 폭염특보 1% 정확도 향상은 매일 832,880원의 추가적인 가치를 부여할 수 있고, 100% 정확한 예보가 주어질 경우 여름 동안 폭염특보의 가치는 5,210,500,040원에 달하는 것으로 나타났다. 분석 결과는 서울지역, 65세 이상의 고령자, 병원 방문의 건강 영향으로 한정된 결과이다. 따라서 지역, 대상인구, 폭염 영향 분야를 확장하거나, 특히 사망자를 고려할 경우 폭염특보의 가치는 훨씬 커질 수 있다. 비용-손실 모델의 특성상 예보정확도보다 대비행동으로 인한 비용과 위험기상 발생 피해 손실의 규모에 따라 폭염특보의 가치는 크게 달라질 수 있다. 그런데, 본 연구는 2016년의 폭염특보 가치만을 평가함으로써 시기별·연도별 비교·분석을 통한 일반화된 결과를 도출하지 못한 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 지자체의 정책 예산 및 건강보험 청구금액과 같은 실제 데이터를 사용하여 폭염특보 정보의 가치를 정량적으로 추정한데 의의가 있다. 향후 폭염이 극심했던 2018년의 건강보험 청구자료가 제공될 경우 본 연구 결과와 비교를 통해 시기별 가치 변화 분석이 가능할 것이다.

다음으로, 국립기상과학원에서 수행하고 있는 관측장비 활용 및 예측모델 정확도 개선을 위한 연구개발의 경제적 가치 추정을 위해 경제학적 접근 방법인 컨조인트 분석법을 이용하여 관측장비 활용 개선 및 예측모델 정확도 개선에 대한 비시장적 편익을 추정하고자 하였으며, 이를 위해 전문가 자문을 통해 설문지를 구성하고, 전국의 1,000

가구를 대상으로 전문 설문기관을 통해 1:1 면접조사를 시행했다. 설문결과를 중첩로짓모형으로 분석한 결과, 추정계수는 통계적으로 모두 유의했으며, 각 속성별 한계지불의사액 또한 모두 유의수준 5%에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 각 속성별 한계지불의사액은 기상항공기의 활용 시간을 1시간 개선했을 때 34원, 재해 발생시 모바일 기상관측차량의 활용을 1%p 개선할 때 31원, 황사·연무통합예측모델의 예측정확도를 1%p 개선할 때 48원, 지역 파랑예측모델의 예측정확도를 1%p 개선할 때 18원, 기후예측모델의 예측정확도를 1%p 개선할 때 17원으로 나타났다. 연구에서 제시된 다섯가지 속성들 중 황사·연무예측모델 예측정확도 개선에 대한 비시장적 편익이 다른 속성들보다 크게 나타난 것은 다른 속성들보다 '황사·연무'가 응답자들에게 익숙하고, 최근 대기질에 관한 국민들의 관심이 높아진 것이 원인일 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 예측정확도 개선과 관측장비 활용 개선과 관련된 인식 제고 방안 마련 및 홍보의 기초자료 등으로 활용 가능하다. 향후 속성별 한계지불의사액의 차이와 응답자의 사회경제적변수에 따른 한계지불의사액 차이, 각각의 속성별 세분화된 경제적 가치 추정 등과 관련한 후속 연구가 진행되면 이와 관련한 정책개발과 재정의 우선투자 등을 위한 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

「기상정보활용 및 가치창출 지원 연구」를 통해 기상 분야와 관련된 체계적 기술개발 전략과 기상청의 실효성 높은 정책 발굴을 위한 기반을 마련할 수 있다. 또한, 사회과학 분야와의 융합 연구를 다변화하여 기상기후 정보의 가치를 높이고 그 성과의 홍보 및 확산에 기여할 것이다. 이를 위해 지속적인 연구사업 수행을 통한 수요자 중심의 기상정보 활용 및 가치창출 지원의 극대화가 필요하다.

참고 문헌

ACGIH, 2015, Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposures indices 2015, American conference of governmental industrial hygienists, Cincinnati, OH.

Adamowicz, W., Louviere, J., and Williams, M., 1994, Combining revealed and stated preference methods for valuing environmental amenities, Journal of environmental economics and management, 26(3), 271-292.

Alfano, F.R.A., Malchaire, J., Palella, B.I., and Riccio, G., 2014, WBGT index revisited after 60 years of use, Annals of Occupational Hygiene, 58(8), 955-970.

Allen, M.J. and Sheridan, S.C., 2014, High-mortality days during the winter season: comparing meteorological conditions across 5 U.S. cities. Int J Biometeorol. 58, 217-225.

Analitis, A., Katsouyanni, K., Biggeri, A., Baccini, M., Forsberg, B., Bisanti, L., Kirchmayer, U., Ballester, F., Cadum, E., Goodman, P.G., Hojs, A., Sunyer, J., Tiittanen, P., and Michelozzi, P., 2008, Effects of cold weather on mortality: Results from 15 European cities within the PHEWE Project. Amer. J. Epidemiol., 168(12), 1397-1408.

Benmarhnia, T., Bailey, Z., Kaiser, D., Auger, N., King, N., and Kaufman, J.S., 2016, A difference-in-differences approach to assess the effect of a heat action plan on heat-related mortality, and differences in effectiveness according to sex, age, and socioeconomic status (Montreal, Quebec), Environmental health perspectives, 124(11), 1694-1699.

CDC, 2006, Heat-related death-United States, 1999-2003, Morbidity and mortality weekly report, 55(29), 797-798.

Cho, Y.S., Koo, Y.M., Lee, J.S., and Lee, J.-W., 2011, Economic benefit analysis of urban meteorological information service using contingent valuation method, Environmental and resource economics review, 20(4), 643-662. (in Korean)

Diaz, J., Ricardo, G., Cesar, L., Cristina, L., Aurelio, T., and Luis, P., 2005, Mortality impact of extreme winter temperatures. Int. J. Biometeorol., 49, 179-183.

Dunne, J.P., Stouffer, R.J., and John, J.G., 2013, Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming, National climate change, 3, 563-566.

Ebi, K.L., Teisberg, T.J., Kalkstein, L.S., Robinson, L., and Weiher, R.F., 2004, Heat watch/warning systems save lives: Estimated costs and benefits for Philadelphia 1995-98, Bulletin of American meteorological society, 85(8), 1067-1073.

Frei, T., Gruenigen, S.V., and Willemse, S., 2014, Economic benefit of meteorology in the Swiss road transportation sector, Meteorological applications, 21(2), 294-300.

Gray, M., 2015, Public weather service value for money review, Public weather service customer group secretariat Met Office, 25p.

Ha, J., Yoon, J., and Kim, H., 2009, Relationship between winter temperature and mortality in Seoul, Korea, from 1994 to 2006. Science of the Total Environment, 407, 2158 - 2164.

Hajat, S. and Kosatky, T., 2010, Heat-related mortality: a review and exploration of

heterogeneity, Journal of epidemiology and community health, 64(9), 753-760.

Hausman, J. and McFadden, D., 1984, Specification tests for the multinomial logit model, Econometrica, 52(5), 1219-1240.

Hondula, D.M., Vanos, J.K., and Gosling, S.N., 2014, The SSC: a decade of climate-health research and future directions. Int J Biometeorol 58:109 - 120. doi:10.1007/s00484-012-0619-6

IPCC, 2014, Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects, Cambridge university press, Cambridge.

Jamason, P.F., Kalkstein, L.S., and Gergen, P.J., 1997, A synoptic evaluation of asthma hospital admissions in New York City. Am. J. Respir. Crit. Care. Med., 156, 1781-1788.

Jin, S.-J., Lim, S.-Y., Park, S.-H., and Yoo, S.-H., 2014, Measuring the scientific benefits from the deep-sea human-operated vehicle project: A choice experiment study, Ocean and polar research, 36(3), 277-288. (in Korean)

Jung, W.-S., Park, J.-K., Kim, E.-B. and Song, J.-H., 2009, Study on the establishment of threshold criteria for heat health watch warning system in Korea: Part Ⅱ: Improvement of criteria, Journal of the environmental sciences, 18(7), 781-796. (in Korean)

Kalkstein, L.S., 1991, A new approach to evaluate the impact of climate on human mortality. Environ. Health Perspectives, 96, 145-150.

Kalkstein, L.S., Nichols, M.C., Barthel, D.C., and Greene S.J., 1996, A New spatial

synoptic classification: Application to air-mass analysis. Int. J. Climatol., 16, 983-1004.

KCDC, 2018, Annual report on the notified patients with heat-related illness in Korea, Korea centers for disease control and prevention. (in Korean)

KDI, 2012, A study on improvement of contingent valuation method analysis guideline for preliminary feasibility studies. (in Korean)

Keatinge, W.R., Donaldson, G.C., Cordioli, E., Martinelli, M., Kunst, A.E., Mackenbach, J.P., Nayha, S., and Vuori, I., 2000, Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study. BMJ, 321, 670-673.

Keatinge, W.R. and Donaldson, G.C., 2004, Winter mortality in elderly people in Britain: Action on outdoor cold stress is needed to reduce winter mortality. BMJ, 329, 976-978.

Kim, D.S., 2010, Introduction: Health of the health care system in Korea, Social work in public health, 25(2), 127-141. (in Korean)

Kim, H.-J., Lim, S.-Y., and Yoo, S.-H., 2016, The non-market benefits of expanding organic waste-to-energy facilities: A choice experiment study, Journal of environmental policy and administration, 24(4), 103-119. (in Korean)

Kim, L., Sakong, J., Kim, Y., Kim, S., Kim, S., Tchoe, B., Jeong, H. and Lee, T., 2013, Developing the inpatient sample for the national health insurance claims data, Health policy and management, 23(2), 152-161. (in Korean)

Kim, M.J. and Lee, Y.S, 2015, A Option Value of Busan-Gimhae Light Rail Vehicle,

The Korea spatial planning review, 87, 81-95. (in Korean)

KISTEP, 2016, Standard Guideline on Preliminary feasibility studies of R&D part, 2-1. (in Korean)

Kjellstrom, T., Holmer, I., and Lemke, B., 2009, Workplace heat stress, health and productivity – an increasing challenge for low and middle-income countries during climate change, Glob health action. 2(1), 2047.

Kjellstrom, T., Lemke, B., Otto, M., Hyatt, O., and Dear, K., 2014, Occupational heat stress: contribution to WHO project on "global assessment of the health impacts of climate change", which started in 2009. Climate change health impact and prevention technical report 2014:4.

KMA, 2011, A white book of Changma. Korea meteorological administration. (in Korean)

KOSHA, 2017, Management guidelines of high-heated working environments, KOSHA guide W-12-2017, Korea occupational safety and health agency. (in Korean)

Koppe, C. and Jendritzky, G., 2005, Inclusion of short-term adaptation to thermal stress in a heat load warning procedure. Meteorologische Zeitschrift, 14(2), 271-278.

Krinsky, I. and Robb, A.L., 1986, On approximating the statistical properties of elasticities, The review of economics and statistics, 68(4), 715-719.

Krupnick, A., Alberini, A., Cropper, M., Simon, N., O'Brien, B., Goerce, R., and Heintzelman, M., 2002, Age, health, and the willingness to pay for mortality risk

reductions: A contingent valuation survey of Ontario residents, Journal of risk and uncertainty, 24(2), 161-186.

Kunkel, K.E., Pielke, R.A.Jr., and Changnon, S.A., 1999, Temporal fluctuation in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80, 1077-1098.

Kwak, S.-J., Yoo, S.-H., and Jang, J.-I., 2006, Valuing the Han-river estuary: Using conjoint analysis, The Korean journal of economic studies, 54(4), 141-161. (in Korean)

Lazo J.K. and Chestnut L.G., 2002, Economic value of current and improved weather forecasts in the U.S. household sector, Stratus consulting, Boulder, CO.

Lee, D.G., Kim, K.R., Kim, J., Kim, B.J., Cho, C.H., Sheridan, S.C., Kalkstein, L.S., Kim, H., and Yi, S.M., 2018, Effects of heat waves on daily excess mortality in 14 Korean cities during the past 20 years (1991 – 2010): an application of the spatial synoptic classification approach. Int. J. Biometeorol., 62, 575-583.

Lee, H.-C., Kang, J.-W., Han, S.-F., and Kim, K.-H., 2016, Valuating the Mangyeong river space using a choice experiment, Journal of environmental policy and administration, 24(3), 1-24. (in Korean)

Lee, J.-W., Jang, J.Y., Ko, K.-K., and Cho, Y.S., 2014, Economic valuation of a new meteorological information service conjoint analysis for a pollen forecast system, American meteorological society, 6(4), 495-505.

Lee, K.K. and Lee, J.W., 2007, The economic value of weather forecasts for decision making problems in the profit/loss situation, Meteorological applications,

14(4), 455-463.

Liljegren, J.C., Carhart, R.A., Lawday, P., Tschopp, S., and Sharp, R., 2008, Modeling the wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements, Journal of occupational and environmental hygiene, 5(10), 645-655.

Louviere, J.J., 1988, Conjoint analysis modeling of stated preferences: a review of theory methods, recent developments and external validity, Journal of transport economics and policy, 22(1), 93-119.

Lucas, R.A.I, Epstein, Y., and Kjellstrom, T., 2014 Excessive occupational heat exposure: a significant ergonomic challenge and health risk for current and future workers, Extreme physiology and medicine, 3, 14.

Ma, W., Yang, C., Chu, C., Li, T., Tan, J., and Kan, H., 2013, The impact of the 2008 cold spell on mortality in Shanghai. Int. J. Biometeorol., 57, 179-184.

Mackenzie, J., 1993, A comparison of contingent preference models, American Journal of Agriculture Economics, 75(3), 593-603.

McFadden, D., 1973, Conditional logit analysis of qualitative choice behavior, in P. Zarembka (ed), Frontiers in econometrics, Academic press, New York, 105-139.

McFadden, D., 1978, Modeling the choice of residential location, in A. Karlqvist, L. Lundqvist, F. Snickars, and J. Weibull (eds), Statial interaction theory and planning models, North Holland, Amsterdam, 75-96.

McGregor, G.R., Watkin, H.A., and Cox, M., 2004, Relationships between the seasonality of temperature and ischemic disease mortality: implications for climate

based health forecasting. Climate research, 25, 253-263.

McMichael, A.J., Campbell-lendrum, D.H., Corvalan, C.F., Ebi, K.L., Githeko, A., Scheraga, J.D., and Woodward, A., 2003, Climate change and human health: risks and responses. World health organization, ISBN 92-4 156248 X, 326pp.

Michelozzi, P., DeDonato, F.K., Bargagli, A.M., Dippoliti, D.D., Sario, M.D., Marino, C., Schfano, P., Cappai, G., Leone, M., Kirchmayer, U., Ventura, M., Gennaro, M., Leonardi, M., Oleari, F., Martino, A.D., and Perucci, C.A., 2010, Surveillance of summer mortality and preparedness to reduce the health impact of heat waves in Italy. Int. J. Environ. Res. Public Health, 7, 2256-2273.

MOIS, 2019, 2018 Statistical yearbook of natural disaster. (in Korean)

Morioka, I., Miyai, N., and Miyashita, K., 2006, Hot environment and health problems of outdoor workers at a construction site, Industrial health, 44(3), 474-480.

NIOSH, 2016, NIOSH criteria for a recommended standard: occupational exposure to heat and hot environments. DHHS (NIOSH) publication 2016-106, National institute for occupational safety and health, Cincinnati, OH.

NWS, 2011, Natural hazard statistics, National weather service.

OSHA, 2013, OSHA technical manual, Section III: health hazards, Chapter 4. Heat stress, Occupational safety and health administration.

Paul, W., Sam, P., Ben, A., Astrid, F., Sari, K., Punam, M., and Anthony, J.M., 2004, Vulnerability to winter mortality in elderly people in Britain: population based study. BMJ, 329, 647-652.

Park, C.Y. and Song, H.S., 2018, Estimating the value of tourisom resources on a regional park using choice experiment, The Korean association for local government studies, 22(3), 343-360. (in Korean)

Park, S.-Y. and Yoo, S.-H., 2017, The public value of improving a weather forecasting system in Korea: a choice experiment study, Applied economics, 50(14), 1644-1658.

Pell, J.P. and Cobbe, S.M., 1999, Seasonal variations in coronary heart disease. QJM, 92, 689-696.

Sarofim, M.C., Saha, S., Hawkins, M.D., and Mills, D.M., 2016, Ch. 2: Temperature-related death and illness, the impacts of climate change on human health in the United States: a scientific assessment, U.S. Global change research program, Washington, DC, 43-68.

Seo, D.I. and Byun, H.R., 2002, Definition of period and occurrence factors of summer and autumn rainy seasons on the Korean peninsula, Atmosphere, 12(3), 402-405.

Seoul, 2016, 2016 Comprehensive heat action plan, Seoul metropolitan government. (in Korean)

Sheridan, S.C., 2002, The redevelopment of a weather-type classification scheme for North America, International journal of climatology, 22, 51-68.

Sheridan, S.C. and Kalkstein, L.S., 2004, Progress in heat watch-warning system technology, Bulletin American meteorological society, 85, 1931-1941.

Shin, Y.J., Park, S.J., and Park, C.R., 2016, Valuation of cultural ecosystem services using the choice experiment method (CE), Journal of the Korean institute of forest recreation, 20(2), 65-77. (in Korean)

Smith, V.K., Kim, H., and Taylor, D.H., 2001, Do the 'near' elderly value mortality risks differently?, USEP workshop on economic valuation of mortality risk reduction: Assessing the state of the art for policy applications, Silver Spring, MD. USEPA.

Tan, J., Kalkstein, L.S., Huang, J., Lin, S., Yin, H., and Shao, D., 2004, An operational heat/health warning system in shanghai, International journal of biometeorology, 48, 157-162.

Vanos, J.K. and Cakmak, S., 2014, Changing air mass frequencies in Canada: potential links and implications for human health, International journal of biometeorology, 58, 121 - 135. doi:10.1007/s00484-013-0634-2

Wilks, D.S., 2001, A skill score based on economic value for probability forecasts, Meteorological applications, 8(2), 209-219.

Yaglou, C.P. and Minard, D., 1956, Prevention of heat casualties at marine corps training centers. Office of naval research physiology branch, Washington DC.

Yoo, S-H., Park, S.-Y., and Kim, S.W., 2011, Economic value of meteorological service, Korean meteorological society, 2011.10., 112-113. (in Korean)

Zhang, Y., Nitschke, M., and Bi, P., 2013, Risk factors for direct heat-related hospitalization during the 2009 Adelaide heatwave: A case crossover study, Science of the total environment, 442(1), 1-5.