

지난 반세기 동안 남한에서 관측된 1월 최저기온의 연차변이

정재은¹ · 정유란¹ · 윤진일¹ · 최동근²

¹경희대학교 생태시스템공학과

²전라북도농업기술원

(2004년 11월 1일 접수; 2004년 11월 18일 수락)

The Observed Change in Interannual Variations of January Minimum Temperature between 1951-1980 and 1971-2000 in South Korea

J. E. Jung¹, U. Chung¹, J. I. Yun¹, and D. K. Choi²

¹Department of Ecosystem Engineering, Kyung Hee University, Suwon, Korea

²Jeonbuk Agricultural Research and Extension Service, Iksan, Korea

(Received November 1, 2004 ; Accepted November 18, 2004)

ABSTRACT

There is a growing concern about the possible increase in inter-annual variation of minimum temperature during the winter season in Korea. This view is strengthened by frequently reported freezing injury to dormant fruit trees, while warmer winters have prevailed recently. The January minimum temperature record at fourteen weather stations was analyzed for 1951-2000. The results showed no evidence of increasing standard deviation at 3 locations between 1951-1980 and 1971-2000, while the remaining 11 stations showed a trend of decreasing standard deviation for the two periods. An empirical model explaining the spatial variation of the standard deviation was derived by regression analysis of 56 stations' data for 1971-2000. Daily minimum temperature and the site elevation may account for 68% of the observed variations. We applied this model to restore the average standard deviation of the January minimum temperature for 1971-2000, and the result was used to produce gridded minimum temperature data for the recurrence interval of 10 and 30 years at 250m resolution. A digital form of the plant hardiness zone map may be developed from this product for site-specific selection of adapted plant species.

Key words : Global warming, Warm winter, Inter-annual variation, Fruit dormancy

I. 서 언

휴면중인 과수는 내동성이 매우 크지만 겨울에서 봄으로 이행하면서 점차 약해진다. 내동성이 매우 큰 사과 품종 “Haralson”의 경우 한겨울에는 -50°C에서도 생존이 가능하지만 봄에는 차사온도가 -8°C로 급상승한다(Howell and Weiser, 1970). 그 이유는 혹한에 적응해온 추운 지역 토착품종들은 생육기간을 확보하

기 위해 기온이 상승하면 바로 휴면을 깨고 생장을 시작하는 습성을 갖고 있기 때문이다. 일단 휴면이 타 파되면 내동성은 급격히 약해져서 심하지 않은 추위에도 동해를 입을 가능성이 있으므로, 겨울철 기온의 변이가 심한 곳에서는 이러한 북방유래 품종이 반드시 큰 내동성을 갖추었다고 보기는 어렵다. 실제로 온도변이가 심한 북미대륙의 대서양 중부연안에서 시베리아 원산인 복숭아 대목 “Siberian C”는 오히려 만생

중인 “Boone County”나 “Bailey”보다 동해에 취약하다(Faust, 1989). 또한 지두는 겨울철 기온이 -33°C 에서 -40°C 에 달하는 중국 북서부 원산으로서 비슷한 정도로 추운 캐나다 남부지방에서는 재배가 가능하지만, 더 따뜻한 대서양 중부연안에서는 재배가 불가능하다. 즉 이들 북방품종의 내동성은 휴면의 깊이에 의존하므로 잠깐의 온화한 날씨에 휴면을 깨면 탈순화(de-acclimation)에 의해 생장이 가능한 상태로 복귀하려 하고, 이 때 심하지 않은 추위에 의해서도 동해를 입을 수 있게 된다.

지구온난화에 따른 “춥지 않은 겨울” 현상 속에서도(Shim *et al.*, 2000), 낙엽과수의 동해발생 건수는 오히려 증가되어온 것으로 보고 되었다(원예연구소, 2003). 이는 온난화 추세와 함께 겨울기온의 연차변이가 커지는 것이 하나의 원인이 아닐까 하는 생각이 들게 한다. 만약 최저기온의 연차변이가 커지는 것이 사실이라면 여러 해 겨울을 겪어야 하는 영년생 과수에 있어 월동기간 중 휴면교란에 따른 동해위험이 더 커질 수도 있을 것이다.

본 연구는 첫째, 겨울철 최저기온의 변이가 더 심해졌는가에 대한 해답을 찾고, 둘째, 관측된 연차변이를 이용한 재현기간별 최저기온 예측가능성을 검토하기 위해 수행되었다. 여기서 연차변이는 30년 이상 장기 관측자료로부터 계산된 일최저기온의 표준편차를 의미한다.

II. 재료 및 방법

2.1. 월별 최저기온 추세 분석

기상청으로부터 강릉, 서울, 인천, 울릉도, 추풍령, 포항, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 목포, 여수, 제주 등 14개 기상관서의 1951-2000 기간 중 일최저기온 자료를 수집하였다(Fig. 1). 이들로부터 1951-2000(전체), 1951-1980(과거) 및 1971-2000(현재) 기간 중 일최저기온의 월별 평균 및 표준편차를 계산하였고, 월별 최저기온을 따로 발췌하여 전체, 과거 및 현재기간에 대해 각각 평균과 표준편차를 구하였다.

2.2. 1월 최저기온 연차변이의 공간분포 추정

제주도, 울릉도 등 도서지방을 제외한 남한 56개 기상관서의 1971-2000(일부 지점은 1973-2000) 기간 중 1월 최저기온자료로부터 평균과 표준편차를 계산하

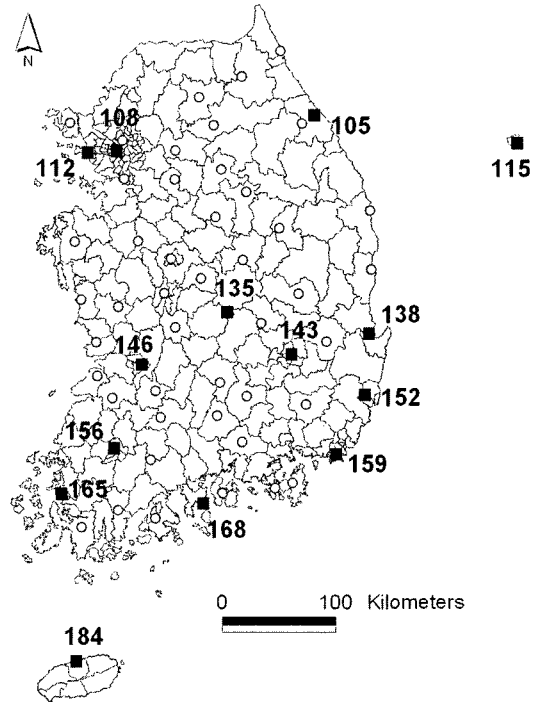


Fig. 1. Locations of the 14 climate observation stations with 50 year data records (solid rectangle) and the additional 44 weather stations with 30 year data records (grey circle). Station Identification: 105 (Gangneung), 108 (Seoul), 112 (Incheon), 115 (Ulleung), 135 (Chupung), 138 (Pohang), 143 (Daegu), 146 (Jeonju), 152 (Ulsan), 156 (Gwangju), 159 (Busan), 165 (Mokpo), 168 (Yeosu), 184 (Jeju).

였다(Fig. 1). 임의지점에서 기대할 수 있는 최저기온의 연차변이, 즉 표준편차의 공간분포를 추정하기 위해서는 관측소의 환경과 관측된 연차변이 사이의 관계를 정량화 할 필요가 있다. 이를 위해 표준편차를 종속변수로 두고 관측소의 위도, 해발고도, 해안으로부터 거리, 인구 등 관측환경을 독립변수로 하는 최적회귀모형을 도출하였다. 위도는 부산대학교 지구과학교육과에서 제작한 전국 기상관서 관측상수 가운데 위도를 decimal degree(예, 36.7567)로 표현하였다(기상청, 1999). 해안으로부터의 거리는 관측소에서 최단직선거리를 m 단위로 표현하였는데, 분수령(백두대간)을 기준으로 동쪽과 서쪽으로 나누어 서쪽일 경우 2배의 가중치를 부여하였다. 인구는 1985년을 기준으로 Choi *et al.*(2003)의 방법에 따라 수치인구모형(digital population model, DPM)을 계산하고 관측소 주변 2.5km 평활화값을 발췌하였다. 최적모형의 선발은

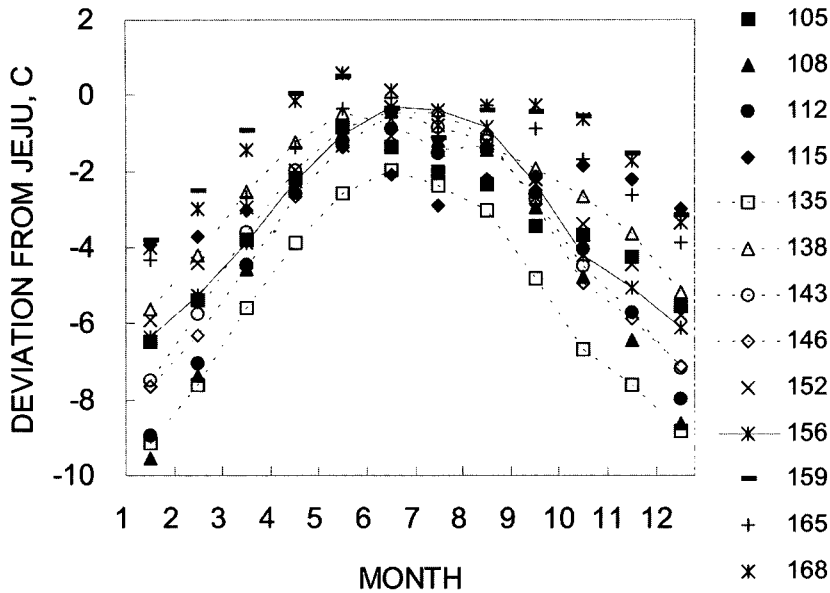


Fig. 2. Monthly average of daily minimum temperature for 1951-2000 at 13 weather stations in South Korea. Each value represents the departure from the reference data of Jeju station which are depicted by the line along zero deviation. Station Identification: 105 (Gangneung), 108 (Seoul), 112 (Incheon), 115 (Ulleung), 135 (Chupung), 138 (Pohang), 143 (Daegu), 146 (Jeonju), 152 (Ulsan), 156 (Gwangju), 159 (Busan), 165 (Mokpo), 168 (Yeosu).

stepwise 및 maximum R² 변수선택법을 이용한 회귀 분석에 의해 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 최근 50년간 최저기온의 월별 평균과 표준편차

14개 지점 가운데 가장 추운 겨울을 겪은 지역은 서울, 추풍령, 인천으로서 일 최저기온의 1월 평균값이 영하 7°C 정도이다. 다음이 대구와 전주로서 영하 5°C이며 포항, 울산, 광주, 강릉이 그 뒤를 따른다. 제주는 이들 중 유일하게 1월 최저기온이 영상을 유지한다. 겨울철 기온의 공간분포는 관측소의 위도, 해양성-대륙성, 그리고 해발고도에 의해 결정되는 교과서적인 특징을 보이며, 공간변이가 여름철에 비해 훨씬 크다. 여름철 최저기온의 공간분포 양상은 위도보다는 관측소의 해발고도와 해양성에 의해 큰 영향을 받으며 강릉, 추풍령, 울릉도에서 가장 낮은 값을 보인다. 제주를 기준으로 하여 기온편차를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 4, 5, 6월에는 제주와 비슷하거나 오히려 더 높은 기온을 보이는 지점이 나타난다.

최저기온 측면에서 가장 안정된 계절은 5월이다. 예를 들어 5월의 기온은 10년 전이나 지금이나 큰 변화

가 없으며 올해나 내년이나 거의 같은 기온을 기대해도 좋다. 그 중에서도 여수, 목포, 부산 등 남해안 항구 도시에서 가장 안정된 모습을 보인다. 특히 여수는 4, 5, 6월 3개월의 표준편차가 1.0 미만을 보인다. 이는 3년 중 2년은 봄철 최저기온 변동폭이 1도를 벗어나지 않는다는 뜻이다. 같은 해안도시지방이라도 포항, 제주, 강릉은 5월 기온변이가 가장 큰 지역이다(Fig. 3).

반대로 가장 불안정한 계절은 1월로서 지역별로는 서울, 인천, 포항, 대구 순이다. 1월 최저기온의 변동폭이 가장 적은 지역은 제주, 목포, 울릉도 등 해안도시지방인데, 인천, 포항, 부산, 울산은 예외적으로 변이가 큰 편에 속한다. 12개월 전체로 봤을 때 가장 연차변이가 안정된 지역은 제주, 울릉도 순으로 역시 바다의 영향이 두드러진다.

기온연차변이의 계절분포양상이 기온양상과 거의 반대인데 차이점은 6-9월 우기의 변이가 기대보다 크다는 점이다.

3.2. 일 최저기온 연차변이의 과거와 현재

과연 1월 최저기온의 변이는 증가해왔는가. 1951-1980 및 1971-2000 두 평년기간의 표준편차를 비교한 결과 14 지점 중 11개에서 오히려 감소한 것으로

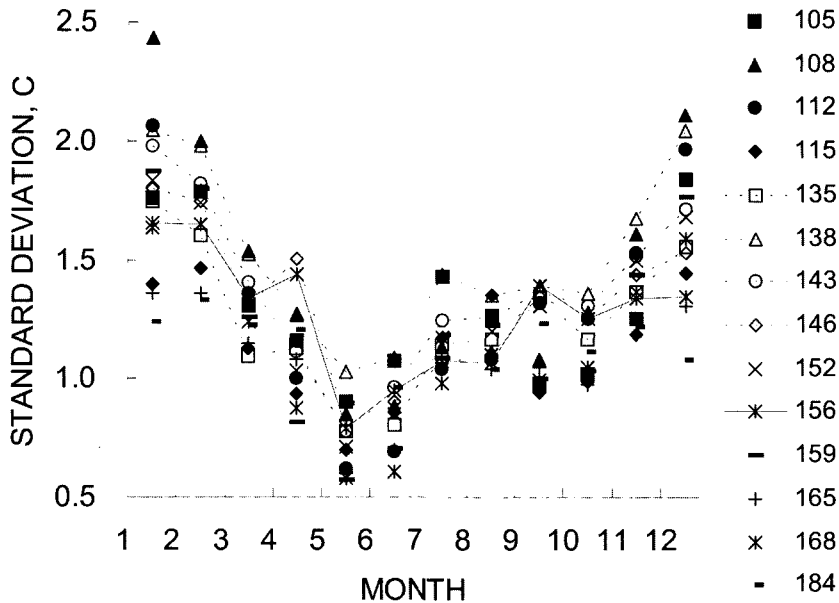


Fig. 3. Monthly standard deviation of daily minimum temperature for 1951-2000 at 14 weather stations in South Korea. Station Identification: 105 (Gangneung), 108 (Seoul), 112 (Incheon), 115 (Ulleung), 135 (Chupung), 138 (Pohang), 143 (Daegu), 146 (Jeonju), 152 (Ulsan), 156 (Gwangju), 159 (Busan), 165 (Mokpo), 168 (Yeosu), 184 (Jeju).

나타났다. 제주에서만 0.13만큼 증가했고, 전주와 울릉도는 거의 변화가 없었다. 나머지 11개 지점에서는 많게는 0.35(서울)에서 적게는 0.03(강릉)까지 고르게 연차변이가 감소하였다(Table 1).

12월의 경우 14 지점 모두 감소했는데 그 폭이 1월보다 훨씬 커서 제주에서도 0.1 감소했고 인천에서

는 무려 0.74 감소한 것으로 나타났다. 감소폭은 작지만 3월도 모든 지점에서 변이폭이 감소한 계절이다.

반면 최저기온의 변이증가가 가장 뚜렷한 계절은 7월로서 추풍령을 제외하고 모든 지점에서 0.02(인천)에서 0.29(울산)씩 연차변이가 증가하였다. 이 밖에도 4월과 11월에는 변이폭이 증가한 지점이 압도적으로 많

Table 1. Change in the standard deviation of monthly minimum temperatures between 1951-1980 and 1971-2000 periods at 14 climate observing stations in South Korea

	105	108	112	115	135	138	143	146	152	156	159	165	168	184
Jan	-0.03	-0.35	-0.14	0.01	-0.18	-0.20	-0.20	0.06	-0.16	-0.15	-0.11	-0.04	-0.11	0.13
Feb	-0.11	-0.05	-0.16	-0.07	-0.03	0.02	0.16	0.06	0.11	0.02	0.14	-0.07	0.06	0.16
Mar	-0.15	-0.21	-0.21	-0.16	-0.40	-0.05	-0.26	-0.30	-0.15	-0.33	-0.19	-0.25	-0.31	-0.03
Apr	0.25	0.13	0.27	0.11	0.05	0.09	0.19	-0.02	0.16	-0.18	0.26	0.03	0.12	0.00
May	-0.09	-0.15	-0.08	0.01	-0.29	-0.03	0.20	-0.11	0.31	-0.03	0.05	-0.05	0.03	0.27
Jun	0.08	-0.06	-0.02	0.02	0.04	-0.18	0.05	-0.02	0.04	0.03	-0.06	-0.16	-0.07	0.03
Jul	0.23	0.04	0.02	0.15	-0.04	0.10	0.20	0.06	0.29	0.07	0.22	0.09	0.11	0.11
Aug	0.21	-0.03	0.03	0.20	-0.12	0.03	0.08	-0.11	0.17	-0.06	0.12	-0.07	-0.03	0.16
Sep	0.08	0.12	0.11	0.09	-0.01	0.11	-0.02	0.06	0.12	-0.03	0.24	-0.07	0.04	-0.01
Oct	0.08	-0.06	0.08	0.10	0.01	0.14	0.05	-0.01	0.09	-0.11	0.08	-0.09	-0.02	0.04
Nov	0.05	0.01	-0.02	0.11	-0.02	-0.14	0.09	0.11	0.03	0.17	0.09	0.07	-0.03	0.13
Dec	-0.55	-0.71	-0.74	-0.40	-0.56	-0.49	-0.24	-0.37	-0.32	-0.28	-0.35	-0.50	-0.46	-0.10

Station Identification : 105 (Gangneung), 108 (Seoul), 112 (Incheon), 115 (Ulleung), 135 (Chupung), 138 (Pohang), 143 (Daegu), 146 (Jeonju), 152 (Ulsan), 156 (Gwangju), 159 (Busan), 165 (Mokpo), 168 (Yeosu), 184 (Jeju).

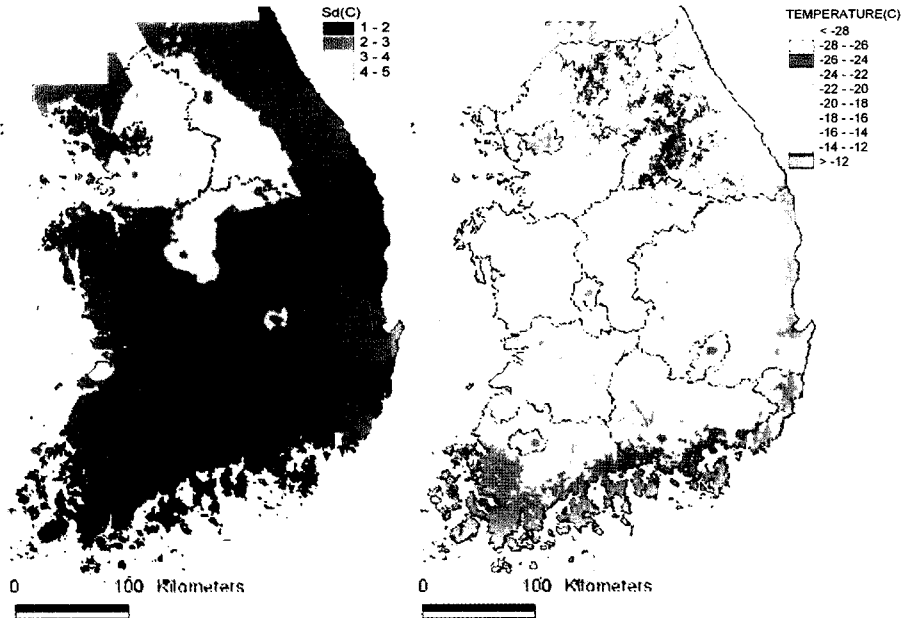


Fig. 4. Estimated spatial pattern of the standard deviation (Left) and the average (Right) for January minimum temperature during 1971-2000. Fifty six weather station data were used to produce these maps based on geospatial interpolation models.

았다. 나머지 계절에는 증가와 감소가 엇비슷한 경향이 있었다. 지점별로는 서울, 추풍령, 광주, 목포에서는 변이폭이 감소한 달이 많았고, 울릉도, 대구, 울산, 부산, 제주에서는 증가한 달이 더 많았다.

결론적으로 당초 예상했던 “겨울기온의 연차변이 증가”는 사실이 아니며 오히려 12월과 1월의 연차변이가 상당히 폭 줄어들었음을 확인할 수 있다.

3.3. 1월 최저기온 연차변이의 공간분포 해석

56개 내륙 기상관서 자료(1월 최저기온 30년치)를 분석한 결과 지난 30년간 1월 최저기온의 연차변이와 가장 관련이 깊은 환경변수는 위도와 대륙도(해안거리)의 상용대수로서 상관계수(r)가 각각 0.53 및 0.47 정도로 그 영향이 미미하여 당초 기대와는 거리가 멀었다. 중회귀모형 역시 3개 이하의 어떤 변수조합에서도 결정계수와 통계적 유의성을 함께 충족하는 결과를 얻지 못했다. 즉 최저기온의 표준편차는 최저기온의 평균과는 달리 환경변수만으로 해석하기는 어렵다는 것을 알 수 있다. 따라서 환경변수를 직접 이용하지 않고, 여러 환경변수의 간접적이지만 종합적인 표현이라 할 수 있는 최저기온 자체를 독립변수로 이용해 보았더니 표준편차의 공간변이 가운데 60% 이상을 설명할 수 있었다. 이를

근거로 다음과 같은 실용모형을 작성하였다.

$$Sd = 1.36 - 0.0018Z - 0.232T \tag{1}$$

여기서 Sd는 1월 최저기온의 30년간 표준편차(°C), Z는 해발고도(m), T는 일최저기온의 1월 평균(°C)이다. 이 식이 의미하는 것은, 임의지점의 1월 최저기온 표준편차, 즉 연차변이는 그 지점의 1월 최저기온이 낮을수록 커지고, 그 지점의 해발고도가 높을수록 줄어든다는 것이다. 1월 최저기온이 낮은 곳은 대개 높은 산악이거나 내륙 깊은 곳인데, 대체로 내륙지방에서 연차변이가 큰 경향이지만 높은 산의 경우 오히려 연차변이가 덜하다는 경험적인 내용을 담고 있다. 이 식에 의한 우리나라 1월 최저기온의 표준편차는 남해안의 1.4에서 중서부내륙의 4.0에 이르지만 대관령 같은 고령지의 경우 최저기온이 낮음에도 오히려 변이폭이 적다. 또한 앞에서 본 바와 같이 과거 30년에 비해 최근 30년 동안 1월의 표준편차가 줄어들었는데 이 식에 의하면 매년 최저기온(T)의 상승, 즉 0에 가까워지는 경향이 반영된 것으로도 해석할 수 있다. 이 식의 통계적 유의성은 $r^2 = 0.684$ (df = 54, F = 57.4)로 표현된다.

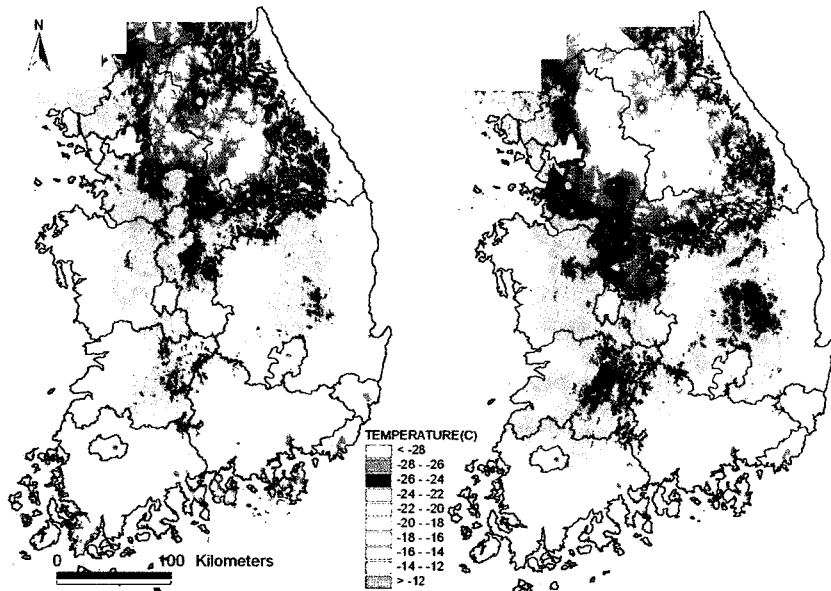


Fig. 5. January minimum temperature pattern expected for the 10- (Left) and 30- (Right) year recurrence interval. These maps were produced by combining the minimum temperature map for a normal year with the standard deviation map for 1971-2000 adjusted by z value of 1.28 and 1.88, respectively.

3.4. 재현기간별 1월 최저기온 분포

1월 최저기온 연차변이모형을 이용하면 기상관서 사이의 빈 공간도 추정값으로 채울 수 있다. 이렇게 해서 표준편차의 연속적인 공간분포가 알려지게 되면 1월 최저기온의 재현확률 혹은 재현기간에 따라 기대되는 최저기온을 역시 연속적인 공간분포로 표현할 수 있다. 물론 이를 위해서는 사전에 지난 30년간 최저기온 분포도가 “전자기후도”(gridded climate data) 형태로 준비되어 있어야 한다. Choi *et al.*(2003)은 1971-2000기간의 일 최저기온 1월 평균값 분포를 남한 전역에 대해 고도 및 도시효과를 고려하여 250m 해상도로 제작한 바 있다. 본 연구에서는 이 일 최저기온 분포도와 수치고도모형을 토대로 식 (1)에 의해 표준편차 분포도를 작성하였다. 또한 Choi *et al.*(2003)과 동일한 방법을 적용하되 일 최저기온 대신 1월 최저기온의 30년 평균값을 근거로 월 최저기온 분포도를 제작하였다.

Fig. 4는 남한전역의 30년 1월 최저기온 분포도와 수치고도모형(digital elevation model, DEM)을 식 (1)에 적용하여 250m 해상도로 추정한 1월 최저기온의 30년 표준편차 분포도이다. 이것은 물론 경험모형에 의한 예상분포도이며 임의지점의 실제 1월 최저기

온 연차변이는 이것과 다를 수 있으며, 또한 경험모형의 변수조합이 개선될 여지도 있을 것이다. 하지만 현재의 관측밀도조건에서 얻을 수 있는 예상분포도로서 최소한의 실용성은 갖춘 것으로 판단된다.

표준편차를 이용하면 재현확률 혹은 재현기간별로 기대할 수 있는 최저기온 범위를 계산할 수 있다. 표준정규분포표에서 $p = 0.1$ 즉 10년 재현기간에 해당하는 z값은 -1.28이며, $p = 0.033$ 즉 30년 재현기간에 해당하는 z값은 -1.84이다. Fig. 4의 1월 최저기온 분포도에 이 값에 해당하는 표준편차만큼씩 더해지면 10년에 한번 혹은 30년에 한번 발생할 수 있는 최저기온 분포도가 된다(Fig. 5).

과원의 위치 선정 혹은 새 작물의 도입시 재현기간별 1월 최저기온 예상도는 좋은 길잡이가 될 수 있다. 미국의 농무부는 이러한 최저기온 지도를 토대로 지역별 재배가능 작물 혹은 수종을 안내하는 Plant Hardiness Zone을 발표해왔는데, 기후변화를 감안하여 15년마다 갱신하고 있다(<http://www.usna.usda.gov/Hardzone/>). 1960년부터 시작한 미국보다 출발은 늦었지만 캐나다에서는 인터넷을 이용한 전자기후도 서비스를 실시하고 있다(<http://sis.agr.ca/cansis/nsdb/climate/hardiness/>). 본 연구의 성과는 이러한 농업기

후시대 구분에 활용될 가능성이 충분하다. 단순히 기온값만 이용하는 기존의 지대구분에 비해 연차변이도 함께 고려된다면 더욱 실용성이 향상될 것이다. 다만 기온의 연차변이보다도 과수동해에 더욱 영향을 끼칠 수 있는 것이 같은 해 겨울(within season) 동안의 기온변이라 할 수 있다. 같은 해 겨울 동안의 일 최고 및 최저기온 변이를 분석하고, Chill Unit 계산에 의한 휴면상태 추정이 가능해지면 더욱 현실적인 동해 위험도 추정, 나아가 실시간 동해경보시스템 설계도 가능해질 것이다.

IV. 적 요

1월의 최저기온을 대상으로 1951년부터 2000년까지 14개 지점의 관측자료를 분석한 결과 11개 지점에서 전반기(1951-1980)에 비해 후반기(1971-2000)의 연차변이가 오히려 감소한 것으로 나타났다. 표준편차로 표현할 경우 제주, 전주, 울릉도를 제외한 나머지 11개 지점에서 많게는 0.35(서울)에서 적게는 0.03(강릉)까지 고르게 연차변이가 감소하였다. 이는 최근의 난동화 경향과 함께 겨울철 최저기온의 연차변이가 더 심해지고 있다는 당초의 예상과 다른 결과이다. 연차변이의 공간분포양상은 최저기온의 절대값과 정의 상관관계를 이용하여 남한전역의 1월 최저기온 30년 표준편차 분포도를 작성하였으며, 이를 토대로 재현기간별

로 기대되는 전국의 극최저기온 분포도를 제작하여 지역별 동해위험 평가에 이용토록 하였다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 농촌진흥청 농업특정연구(포도 동해의 지형기후학적 해석연구) 지원으로 수행되었다. 기후자료를 제공한 기상청 국가농업기상센터에 감사드린다.

인용문헌

- 기상청, 1999: 기상관서 관측상수 정밀측정 연구. 211 pp. 원예연구소, 2003: 복숭아 동해위험지대 구분. 원예시험연구 사업연보(2002) 31pp.
- Choi, J., U. Chung, and J. I. Yun, 2003: Urban effect correction to improve accuracy of spatially interpolated temperature estimates in Korea. *Journal of Applied Meteorology* **42**(12), 1711-1719.
- Faust, M., 1989: Resistance of fruit trees to cold. In *Physiology of Temperate Zone Fruit Trees*. John Wiley and Sons, p307-331.
- Howell, G. S., and C. J. Weiser, 1970: Fluctuations in the cold resistance of apple twigs during spring dehardening. *Journal of American Society of Horticultural Science* **95**, 190-192.
- Shim, K. M., J. T. Lee, S. H. Yun, and K. H. Hwang, 2000: Analysis of meteorological variation during winter barley cropping season in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **2**(3), 95-102. (In Korean with English abstract)