

여름철 한반도 강수의 시·공간적 특성 연구

인소라* · 한상옥 · 임은순 · 김기훈 · 심재관

국립기상연구소 예보연구과 재해기상연구센터

(접수일: 2013년 12월 23일, 수정일: 2014년 2월 6일, 게재확정일: 2014년 2월 27일)

Study on Temporal and Spatial Characteristics of Summertime Precipitation over Korean Peninsula

So-Ra In*, Sang-Ok Han, Eun-Soon Im, Ki-Hoon Kim, and JaeKwan Shim

*High Impact Weather Research Center, Forecast Research Division,
National Institute of Meteorological Research, Gangneung, Korea*

(Manuscript received 23 December 2013; revised 6 February 2014; accepted 27 February 2014)

Abstract This study investigated the temporal and spatial characteristics of summertime (June-August) precipitation over Korean peninsula, using Korea Meteorological Administration (KMA)is Automated Synoptic Observing System (ASOS) data for the period of 1973-2010 and Automatic Weather System (AWS) data for the period of 1998-2010. The authors looked through climatological features of the summertime precipitation, then examined the degree of locality of the precipitation, and probable precipitation amount and its return period of 100 years (i.e., an extreme precipitation event). The amount of monthly total precipitation showed increasing trends for all the summer months during the investigated 38-year period. In particular, the increasing trends were more significant for the months of July and August. The increasing trend of July was seen to be more attributable to the increase of precipitation intensity than that of frequency, while the increasing trend of August was seen to be played more importantly by the increase of the precipitation frequency. The e-folding distance, which is calculated using the correlation of the precipitation at the reference station with those at all other stations, revealed that it is August that has the highest locality of hourly precipitation, indicating higher potential of localized heavy rainfall in August compared to other summer months. More localized precipitation was observed over the western parts of the Korean peninsula where terrain is relatively smooth. Using the 38-years long series of maximum daily and hourly precipitation as input for FARD2006 (Frequency Analysis of Rainfall Data Program 2006), it was revealed that precipitation events with either 360 mm day^{-1} or 80 mm h^{-1} can occur with the return period of 100 years over the Korean Peninsula.

Key words: Precipitation intensity, precipitation frequency, e-folding distance, probability precipitation

*Corresponding Author: So-Ra In, 707 Industry Academy Cooperation Center, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung-si, Gangwon-do 210-702, Korea.
Phone : +82-70-7850-6635, Fax : +82-33-644-2657
E-mail : ijhee0106@korea.kr

1. 서론

기상재해 통계에 의하면 우리나라에서(1993년~2010년) 호우로 인한 피해 규모는 전체 기상재해(약 22조 1,176억 원)의 약 31%(6조 8,460억 원)를 차지하고 있으며, 태풍(10조 8,745억 원)다음으로 큰 피해를 입히는 것으로 알려져 있다(NIMR, 2011). 따라서 한반도의 여름철 강수 특성을 잘 이해하는 것은 재해저감 차원에서도 매우 중요한 일이다.

한반도 여름철의 강수특성에 관한 연구는 과거에도 많은 연구자들에 의해 수행되었다. Kim *et al.* (2005)은 평년(1971년~2000년)기간 동안에 강수 일수 및 강수 강도의 지역성 및 계절성을 조사하였으며 일 강수량이 80 mm 이상인 경우를 다우로, 미만인 경우를 소우로 구분하여 그 특성을 조사하였다. 그 결과 소우에 의한 강수일수는 호남지방에서 많았으며, 특히 가을과 겨울철의 기여도가 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 여름철 다우에 의한 강수일수는 경기지방과 남해안에서 높게 나타났다. Hong *et al.* (2006)은 과거 30년(1976년~2005년)간 우리나라 강수현상의 시간 및 공간 변동 특성을 분석하여 강수현상의 경년 변동은, 주로 강수량과 강수일수가 크게 나타나고, 강수 강도가 강한 남부지방, 영동지방, 소백산맥과 그 서쪽지역 그리고 남부와 중부지역에서 각각 크게 나타남을 보였다. 그리고 Lee *et al.* (2011)의 연구에서는 평년(1971년~2000년) 대비 과거 10년(2001년~2010년)의 연 강수량은 7월의 증가가 가장 컸으며, 장마기간의 강수 강도는 과거에 비해 크게 증가하였고, 장마 후기간의 강수량 최대값이 나타나는 시기가 과거 8월 하순경에서 약 20일 앞당겨짐을 보였다.

Ha *et al.* (2007)은 AWS (Automatic Weather System) 시간 강수(1999년~2002년)를 이용하여 5월~9월의 시·공간적인 특성을 연구하여 강수의 e-folding 거리와 e-folding 시간의 범위가 50~110 km, 1~2시간임을 보였다. 그리고 가장 짧은 e-folding 거리와 시간은 7월과 8월에 나타나며, e-folding 거리는 산악지역(해발고도 100 m 이상, 주변 지역과 고도의 표준편차가 50 m 이하)에서 가장 짧게 나타나고, 복잡한 산악지역(해발고도 100 m 이상, 주변지역과 고도의 표준편차가 50 m 초과)에서 가장 길게 나타남을 보였다.

특히 최근에는 평균적인 변화뿐만 아니라 극값의 변화에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Lee and Kwon (2004)는 1920년~1999년의 대구, 전주, 부산, 목포의 여름철 강수를 분석하여 순별 강수량의 제 2극대기가 9월 초순에서 8월 하순으로 바뀌거나 출현하지 않음을 보였으며, Lee and Seo (2008)은 우리나라의 여름철 극한 강수는 연강수량 분포와 같이 지형의 영향을 많이 받으며 여름철에 강수집중현상이 심화되

고 있는 것으로 분석하였다. Kim and Kim (2011)의 연구에서도 여름철 극한강수는 연강수량의 공간분포와 같이 지형의 영향을 많이 받으며, 해안지역보다는 내륙지역에서 증가가 뚜렷하고 도시화 지역일수록 강수량의 증가와 강수일수의 증가현상이 뚜렷하게 나타남을 보였다. Park *et al.* (2011)은 1904년~2007년의 28개 관측 지점 강수량으로부터 확률강우량을 계산하여, 재현기간 100년의 공간분포가 우리나라의 동쪽과 남서쪽에서 크게 나타남을 보였다.

본 연구에서는 기상청의 ASOS (Automated Synoptic Observing System)와 AWS의 강수관측 자료를 사용하여 여름철 한반도의 강수 특성을 다음과 같은 3가지 관점에서 살펴보았다. 먼저, 최근 38년 기간(1973년~2010년)의 ASOS 일·시간 강수를 이용하여 6~7월 각 월별 총 강수량, 강수 강도 및 강수 빈도의 연변화와 지역적인 분포를 조사하였다. 이는 Hong *et al.* (2006)의 연구에서도 유사한 방법으로 다루어진 것이다. 하지만, Hong *et al.* (2006)은 일강수만을 사용하여 연평균 강수량, 강수 강도 및 발생 일수의 경년 변동과 연내 계절별 강수특성의 공간분포를 주로 살펴보았지만, 본 연구에서는 시간 강수도 분석함으로써 여름철 강수특성이 짧은 시간 단위로도 나타나는지 살펴보려고 하였다. 둘째, 여름철 강수의 국지성 정도를 월별로 비교하고 지역적 분포특성을 살펴보기 위해 Ha *et al.* (2007) 연구에서 사용된 e-folding 거리를 분석하였다. Ha *et al.* (2007)의 연구에서는 4년간(1999년~2002년)의 ASOS와 AWS 자료를 사용하였으나 본 연구에서는 최근 13년 기간(1998년~2010년)으로 자료기간을 늘려 결과의 유의성과 참신성을 보다 확보하였다. 마지막으로 최근 38년 기간(1973년~2010년)의 61개 ASOS 관측 강수를 반영한 한반도 확률강수량의 지역적 분포와 재현주기(return period)를 분석하였다. 이는 한반도 여름철에 발생할 수 있는 극한 강수의 재현주기와 공간분포 특성을 파악하기 위한 것으로서, 본 연구는 앞서 언급한 Park *et al.* (2010)의 연구와 비교해서 자료기간은 짧지만(38년 vs. 105년) 지점수(61개 vs. 28개)를 늘려 확률강수 지역분포의 공간 분해정도를 보다 높였다.

여름철 한반도의 강수특성은 선행연구에서 많이 조사되었지만 본 연구는 위에서 밝힌 3가지 관점을 동시에 다룸으로써 복합적인 여름철 강수 특성을 살펴 보았다. 또한, 선행연구에서 부족한 자료의 지점수는 최대한 확보하여 선행연구에 비해 강수특성의 공간분해능을 높이고자 하였으며, 짧은 자료기간에 대해서는 유용한 최근 기간을 최대한 활용하여 결과의 기후학적 유의성과 참신성을 제고하도록 노력하였다.

서론 이하 본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서 본 연구에 사용된 자료의 종류, 기간 및 품질검사

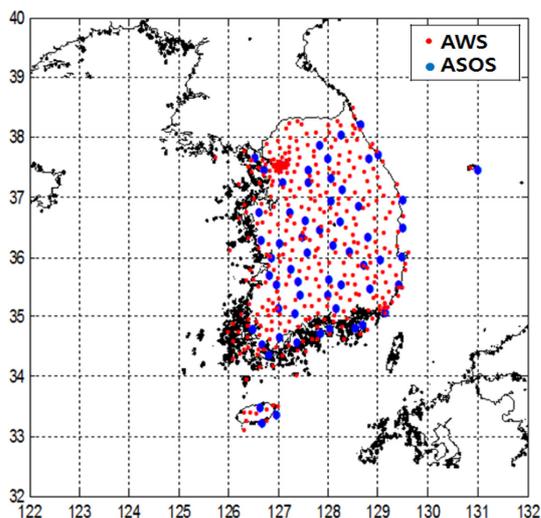


Fig. 1. Map showing the distribution of KMA's surface observation sites: red dots for AWS and blue dots for ASOS.

에 대해서 밝히고, 위에서 언급한 3가지 관점의 강수 특성 분석방법 각각을 설명하였다. 3장에서는 분석결과를 “강수의 일반적인 특성”, “강수의 국지성 정도 특성” 및 “확률강수량”의 3가지 관점 순서로 제시하였으며, 마지막으로 4장에서 본 연구에서 분석된 한반도 여름철 강수특성을 종합적으로 요약 정리하였다.

2. 자료 처리 및 분석방법

본 연구에서 사용된 자료는 ASOS 61개 지점의 38년 기간(1973년~2010년)과 AWS 352개 지점의 최근 13년 기간(1998년~2010년)의 일 강수량과 시간 강수량이다. ASOS와 AWS 지점은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 분포하고 있다. 강수자료는 Ha *et al.* (2007)에서와 같은 품질검사를 거쳐 관측오류를 제거하여 사용하였다. Ha *et al.* (2007)의 방법은 시간적으로 n 시간대의 강수량과 $n-1$ 시간대의 강수량 차이가 300 mm를 초과하면 n 시간대의 관측치가 오류인 것으로 판단하고 $n-1$ 시간대와 $n+1$ 시간대의 평균값으로 n 시간대의 강수량을 대체하는 것이다. 이 방법은 $n-1$ 시간대에 오류가 없다고 가정하여도 n 과 $n+1$ 시간대에 오류가 동시에 존재하면 문제가 발생한다. 다행히 본 연구의 시간 강수 자료에는 오류가 한 건도 발생하지 않았다. 이는 사용된 기상청의 자료가 이미 충분한 품질검사를 거쳤기 때문인 것으로 파악된다. 공간적으로 특정 지점의 강수량이 가장 인접한 4개 지점의 평균치와 3배 이상 차이가 나면 인접 4개 지점의 평균값으로 대체하였다. 우리나라 여름철(6월~8월) 강수의 연 변동 및 공간분포 특성과 강우 강도

재현기간 분석은 ASOS 38년 기간(1973년~2010년) 자료를 사용하였고, 강수의 지점간 거리에 따른 상관관계 분석은 ASOS 61개 지점과 AWS 352개 지점을 합한 413개 지점의 13년간(1998년~2010년) 자료를 사용하였다.

강수의 연 변동 및 공간분포 특성은 38년 기간(1973년~2010년) 동안 여름철(6월~8월) 각 월별로 구분하여 일 강수와 시간 강수에 대해 강수 강도와 강수 빈도의 개념으로 연 변화 추이와 공간분포 특성을 분석하여 조사하였다. 매년 매월 각 지점에서의 일 강수 강도는 월 총강수량을 같은 월의 일 강수 빈도로 나눈 값이며, 매월의 일 강수 빈도는 같은 월의 강수 일수와 같다. 하루 중 0.2 mm 이상 관측이 된 날이 강수 일수로 계산된다. 마찬가지로, 시간 강수 강도는 월 총 강수량을 같은 월의 시간 강수 빈도로 나눈 값이며, 시간 강수 빈도는 같은 월의 강수시간 수와 같다. 매 정시 기준으로 1시간 안에 0.2 mm 이상의 강수가 기록되면 강수시간 수로 계산된다. 매년 월별 61개 ASOS 지점에 대한 공간 산술평균을 38년 기간(1973년~2010년) 동안의 강수 강도와 빈도의 변화추이 분석에 사용하였으며, 각 지점에서 구한 월별 강수 강도와 빈도의 38년간(1973년~2010년) 시간 산술평균을 이용하여 공간분포 특성을 분석하였다.

여름철 한반도 강수의 국지성 정도(degree of locality) 특성을 파악하기 위하여 관측 지점 간의 거리에 따른 강수량의 상관계수를 계산하고, 상관계수 값이 e-folding 값으로 감소하는 거리(e-folding distance)를 각 관측지점에 대해 계산하였다. e-folding 값은 Ha *et al.* (2007)과 같은 0.3673을 사용하였다. 상관계수를 산출하기 위한 자료기간은 앞서 언급한 것처럼 13년(1998년~2010년)이고, 관측지점 수는 413개이다. 강수는 일 강수와 시간 강수 2개 변수로 구분하였고, 5월부터 9월까지 월별로 분석하였다. 즉, 모든 관측지점에서 월별로 일 강수와 시간 강수에 대해 거리의 함수로 상관계수를 산출하였고, 이를 이용하여 각 지점에서의 월별 e-folding 거리를 구하였다.

재현기간별 확률 강우량 계산은 국립 방재 연구원에서 개발한 강우분석 프로그램(FARD2006, Frequency Analysis of Rainfall Data Program 2006)을 이용하였다. 확률 강우량은 통계학적인 빈도개념으로 관측 자료를 이용하여 모집단의 특성을 대변하는 분포형을 가정하고 산정하게 된다. FARD2006은 강우자료의 빈도해석을 위한 프로그램으로 기존의 FARD2002에 기능을 추가하여 개선한 프로그램이다. FARD2006은 Fig. 2와 같은 절차대로 계산된다(NIDP, 1998). 과거 38년(1973년~2010년) ASOS 61개 지점의 일·시간 강수의 연별 지점의 최대값을 강우자료로 사용하였고, 매개변수 추정 방법으로는 확률가중모멘트법을 선택

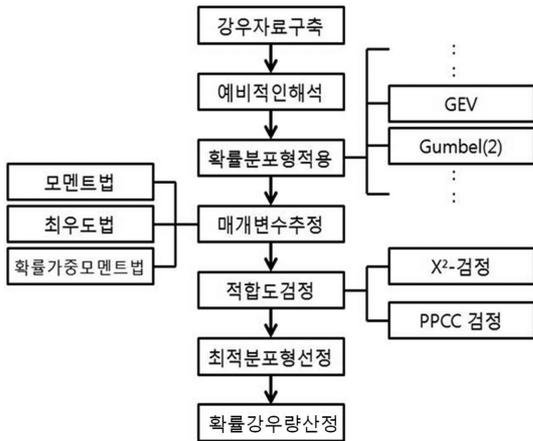


Fig. 2. Flow chart showing the procedure of calculating the probabilistic precipitation amount (Adopted from FARD2006).

하였다. 확률분포형은 일반화된 극치분포(Generalized Extreme Value Distribution, GEV)를 적용하였으며, 적정 확률 분포형의 신뢰도를 높이기 위해 X²-검정과 PPCC (Probability Plot Correlation Coefficient)검정을 확인하였다. 일반화된 극치분포의 적합도 검정은 일강수의 경우 X²-검정과 PPCC 검정에서 약 86%의 적합률을 보였고 시간 강수의 경우 X²-검정은 약 96%, PPCC 검정은 약 86% 적합률을 보였다. 본 연구에서 사용한 확률가중모멘트는 표본자료의 확률가중모멘트와 같다고 가정하여 확률분포의 매개변수를 추정하는 방법으로 자료를 오름차순으로 재배열하고 크기가 가장 큰 자료에 최대 가중치를 주고 가장 작은 자료 값에 최소 가중치를 주는 등 자료의 크기에 따라 가중치를 달리하여 매개 변수를 추정하는 방법이다. 표본의 크기가 작거나 왜곡된 자료일 경우에도 비교적 안정적인 결과를 얻을 수 있어 최근에 가장 많이 사용

된다. 확률가중모멘트의 일반식은 다음과 같이 나타낸다.

$$M_{p,r,s} = E[X^p F^r(X) 1 - F(X)^s]. \quad (1)$$

여기서, p, r, s 는 양의 정수이고, $E[\bullet]$ 는 기대치를 표시하며, $F(x)$ 는 누가확률 혹은 비초과확률, $1 - F(x)$ 는 초과확률을 표현한다.

일반극치분포(GEV)의 확률밀도함수와 누가확률밀도함수는 다음과 같이 표시된다.

$$f(X) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{\beta(X-X_0)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\beta}-1} \exp \left[- \left(1 - \frac{\beta(X-X_0)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right], \quad (2)$$

$$F(X) = \exp \left[- \left(1 - \frac{\beta(X-X_0)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right]. \quad (3)$$

여기서 α 는 축적변수, β 는 형상변수, X_0 는 위치변수이다. 변수 X 의 범위는 β 의 부호에 따라 결정된다. 식 (2)과 식 (3)으로 표시되는 일반극치분포(GEV)는 최대치 혹은 최소치 등의 극치자료계열의 발생빈도를 분석하는데 자주 사용되며, 수문자료 중 홍수량 혹은 갈수량 자료계열의 분석에 널리 사용되고 있다(Yun, 2007).

3. 결 과

3.1 강수의 일반적인 특성

한반도의 여름철(6월~8월) 월별 38년(1973년~2010년) 평균 총 강수량의 공간분포를 Fig. 3에 나타냈다. 그림에 나타난 공간분포는 대체로 모든 월에 대해 Hong *et al.* (2006)에서 제시된 것과 유사함을 확인할 수 있었다. 다만, 본 연구에서는 Hong *et al.* (2006)에

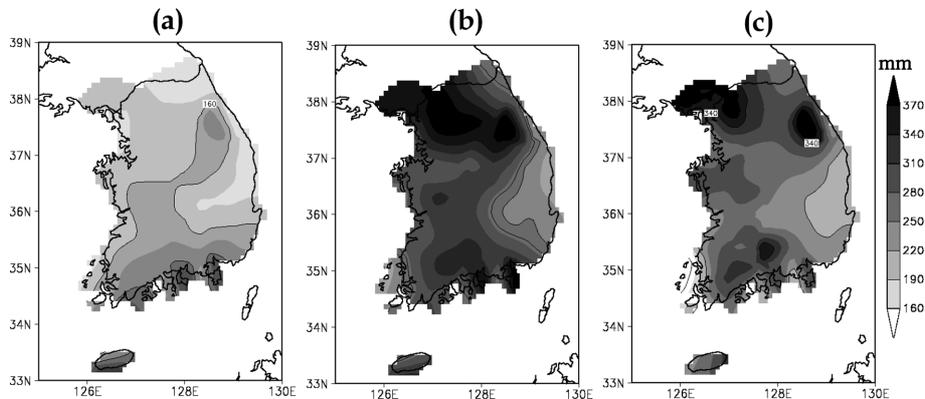


Fig. 3. Distribution of 38-years (1973~2010) long average of monthly total precipitation for (a) June, (b) July, and (c) August.

비교하여 강원남부에 6월과 8월의 국소최대값이 존재한다. 이는 한반도 전체 분포특성에 큰 차이를 보일 정도는 아니지만, 특히 8월의 경우, 강원남부 지역의 국소최대값이 매우 뚜렷하게 나타난다. 이 차이는 분포도를 그리기 위한 강수량자료의 공간 내삽방법의 차이로 기인한 것으로 판단된다. 특히, 강원 산간지역은 ASOS 관측지점이 거의 존재하지 않은 공백지역이기 때문에 내삽오차가 크게 발생할 수 있는 지역이다. 6월에는 장마전선과 관련된 강수가 제주와 남해안 지역까지 영향을 미쳐 220 mm 이상의 강수량이 남해안과 제주 지역에 분포하고 있다. 6월의 강원남부 국소최대값은 Hong *et al.* (2006)의 경북 북부지역 최대값과 연관이 있으며, 언급한 것처럼 내삽에 의한 차이 정도로 판단된다. 7월에는 대체로 태백산맥 서쪽 지역이 상대적으로 강수가 더 많고 경기도에 310 mm 이상의 최대강수량 지역이 나타나는 등, Hong *et al.* (2006)이 제시한 한반도 장마기의 분포특성을 그대로 보여주고 있다. 8월의 경우 강원남부를 제외하고 7월과 마찬가지로 서쪽 지역이 동쪽 지역에 비해 강수량이 더 많이 분포하지만, 그 중심축이 7월의 경우 내륙(대략 소백산맥축과 일치)에 위치한 반면 8월에는 서해안쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있다. 이는 Hong *et al.* (2006)에서도 잘 나타나고 있다. 이상 본 연구와 선행연구의 결과를 토대로 한반도 여름철 강수량 분포특성을 정리하면, 남해안을 제외한 영남지방과 동해안 지역 이외의 주로 서쪽 지역에 상대적으로 많은 강수가 분포하며, 경기도와 남해안(제주 포함)이 최대 강수량 지역이다(Kim *et al.*, 2005; Hong *et al.*, 2006). 한편, 최대 강수량의 분포축이 소백산맥 축과 일치하거나(Figs. 3a, c) 지리산과 같은 산악지역 주변에 국소 최대값이 나타난다(Figs. 3b, c). 이는 Lee and Seo (2008)과 Kim and Kim (2011)의 연구에서 언급된 바와 같이 산악의 지형성 극한 강수의 발생과 관련이 있다. 강원남부의 국소최대값은 다우지역인 경기도의 풍하축(7·8월 강수셀의 이동궤목)에 위치하면서 산악의 지형성 강제력에 의한 영향으로 나타난 것으로 사료되지만 더 자세한 원인은 이 지역 강수형태에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

Figure 4는 한반도 월별 ASOS지점 평균 총 강수량의 38년간 변화 추이를 나타낸 것이다. 모든 월(6월~8월)에서 지난 38년간 강수량이 증가하고 있음이 기울기 선으로 잘 나타난다. 특히 6월(기울기 0.07)에 비해 7월(기울기 2.97)과 8월(기울기 2.52)의 증가 추세가 현저하게 나타나고 있으며, 7월의 증가 추세가 가장 크게 나타났다. 7월 강수의 증가 추세는 Lee *et al.* (2011)에서도 밝혀진 바 있고 그 들은 장마기간의 강수 강도 증가를 한 원인으로 보고 있다. 본 연구의 강수 강도 변화추세(Fig. 5)와 강수 빈도 변화추세(Fig.

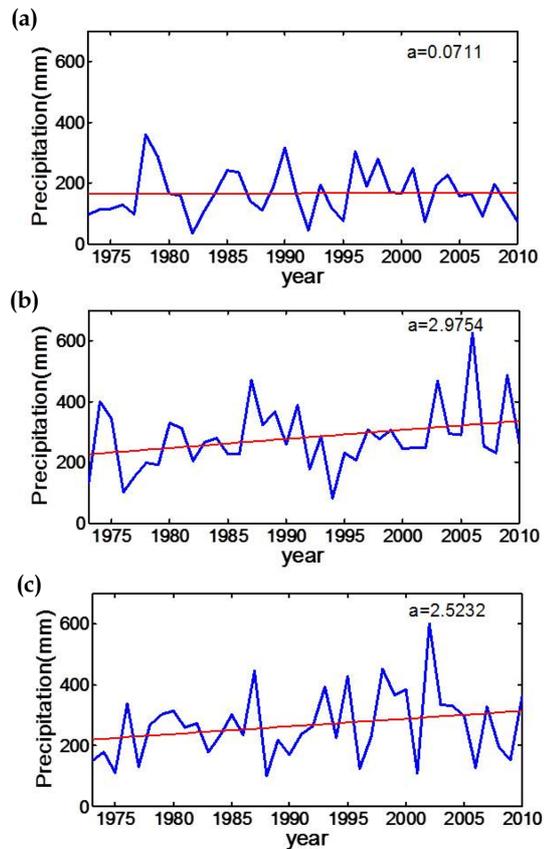


Fig. 4. Plots of annual mean monthly precipitation over Korea during the ASOS data length, 38 years, for (a) June, (b) July, and (c) August. In each graph, the red straight line indicates the mean trend of either increase or decrease as shown by declination value “a”.

6)를 통해서도 Lee *et al.* (2011)의 주장을 확인할 수 있었다. 즉, 7월의 강수량 증가는 강수 강도의 증가(Fig. 5b)가 빈도의 증가(Fig. 6b)보다 더 기여함을 알 수 있다. 8월의 경우 오히려 빈도가 강도보다 강수량 증가에 더 기여하고 있음을 확인할 수가 있다(Figs. 5c and 6c). 한편, 6월의 강수량 증가 추세가 상대적으로 미미한 것은 Fig. 5a와 Fig. 6a에 보인 것처럼 강수 강도는 증가하였으나 강수 빈도는 오히려 감소함으로써 서로 상쇄효과가 발생한 것 때문인 것으로 파악된다. 본 연구에서는 강수 강도와 빈도의 연변화 추세를 분석함에 있어 일강수와 더불어 시간 강수에 대해서도 같이 분석하였으나 뚜렷한 경향의 차이를 발견할 수 없어 위 설명에서 일강수 분석결과만 활용하였다.

Figures 7과 8은 각각 38년 평균 일 강수 강도와 빈도의 공간분포를 월별로 나타낸 것이다. 시간 강수에

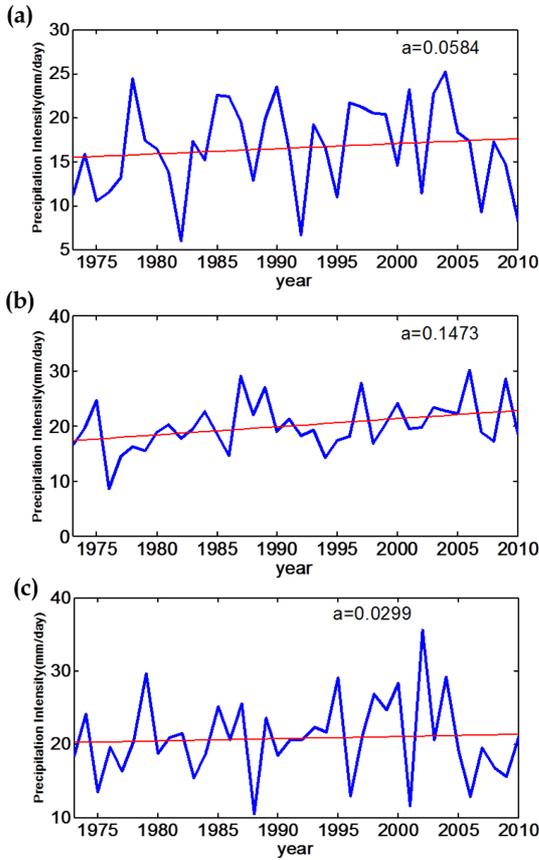


Fig. 5. Plots of annual mean daily precipitation intensity over Korea for (a) June, (b) July, and (c) August during the ASOS data length, 38 years. In each graph, the red straight line indicates the mean trend of either increase or decrease as shown by declination value “a”.

대해서도 분석하였으나 일강수의 강도와 빈도 분포 특성과 뚜렷한 차이를 발견하지 못하여 일강수 강도와 빈도만을 가지고 공간분포 특성을 설명하기로 한다. 일강수 강도(Fig. 7)를 보면, 6월(Fig. 7a)은 강원영서남부, 충청도 일부와 남해안 지역에서 약 18 mm day⁻¹ 이상의 강수 강도가 나타났으며, 경기북부, 강원북부, 강원영동 지역은 약 10 mm day⁻¹의 상대적으로 약한 강수 강도가 나타났다. 그리고 7월과 8월(Figs. 7b, c)은 비슷한 공간분포를 보였다. 경기도, 강원영서남부, 서해안 일부지역과 남해안 지역에서 약 22 mm day⁻¹의 최대 강도가 나타났으며, 강원영동과 영남 지역으로는 약 14 mm day⁻¹ 이하의 상대적으로 약한 강수 강도가 나타났다. 일 강수 빈도(Fig. 8)의 경우 공통적으로 경기도, 강원남부산간과 남해안 지역으로 높은 빈도 분포를 보였다. 이 들 지역에서 6월은 약 10

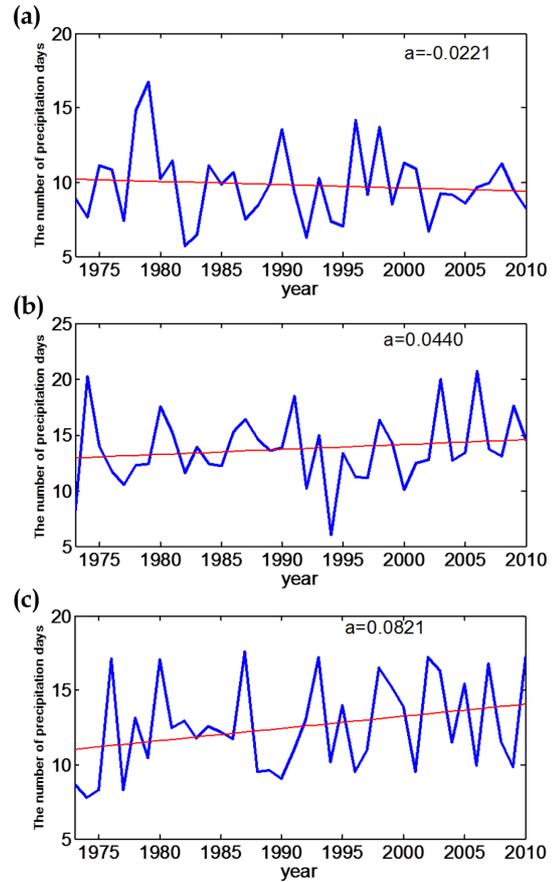


Fig. 6. The same as Fig. 5 but for the number of precipitating days.

일 이상이었고, 7월과 8월은 13일 이상 강수가 발생하는 것으로 나타났다. 강수의 강도와 빈도분포는 대체로 강수량 분포와 일치하고 있고, 위에 언급한 특성들은 여름철 한반도 기압계가 대륙으로부터 유입되거나 장마전선의 이동에 따라 남북으로 이동하는 것과 관련이 있기 때문이다(Ho and Kang, 1988; Kim *et al.*, 2005).

3.2 강수의 국지성 정도(degree of locality) 특성

한반도 강수의 국지성 정도를 알아보기 위해 ASOS 352개, AWS 61개 지점의 1998년부터 2010년까지 5월~9월의 자료를 이용하여 각 지점 사이의 거리에 따른 강수량의 상관도를 분석하였다. 지점별 일 강수량과의 상관관계를 나타낸 Fig. 13을 보면, 5월이 거리에 따른 강수 상관도의 감소폭이 가장 작게 나타났으며, 7월과 8월은 상관도의 감소폭이 크게 나타났다. 월별 일강수의 e-folding 거리(Fig. 10)는 5월이 약 425

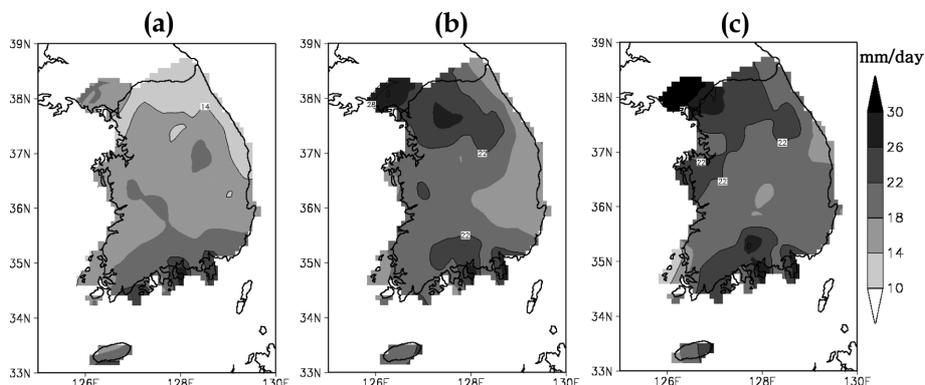


Fig. 7. Distribution of 38-years long average of daily precipitation intensity for (a) June, (b) July, and (c) August.

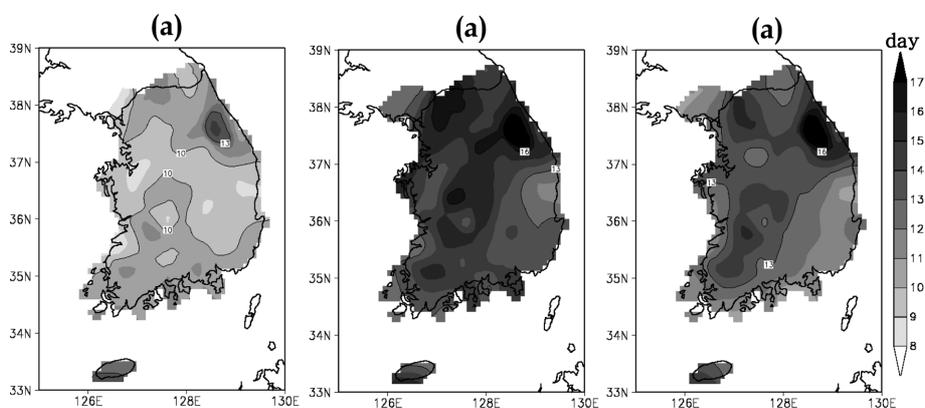


Fig. 8. The same as Fig. 9 but for the number of precipitating days.

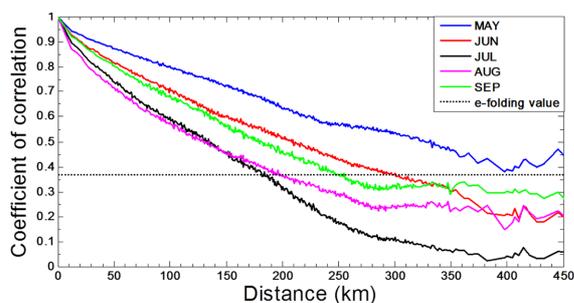


Fig. 9. Plots of correlation coefficient for given distances, between two sites of certain distant apart, of daily precipitation, averaged among the AWS sites for months from May to September as indicated by line colors.

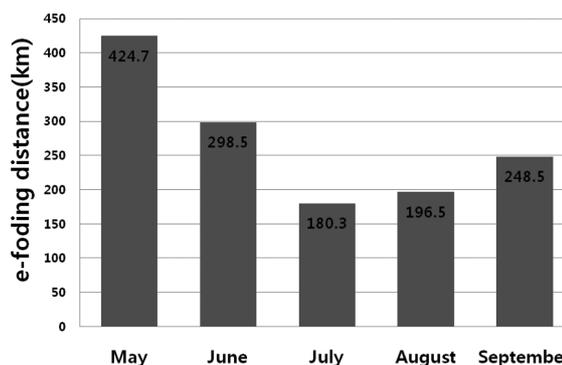


Fig. 10. Bar graph showing the average e-folding distance of daily precipitation over Korea for each of 5 months, from May to September.

km로 가장 컸으며, 7월과 8월은 각각 약 180 km와 197 km로 작게 나타났다. 시간 강수(Fig. 11)의 경우 일강수와 비슷한 특성을 보이고 있으나 8월의 e-folding 거리가 7월에 비해 다소 짧았다(Figs. 11 and 12). 위

결과는 Ha *et al.* (2007)의 결과와 일치하고 있으며, 이를 통해 7월과 8월은 강수의 국지성이 상대적으로 더 커질 수 있음이 확인되었다. 즉, 7월과 8월에는 짧

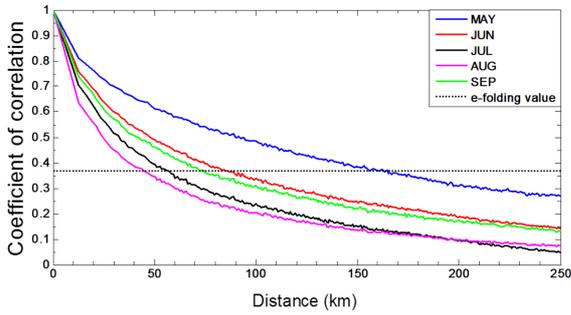


Fig. 11. The same as Fig. 9 but for hourly precipitation.

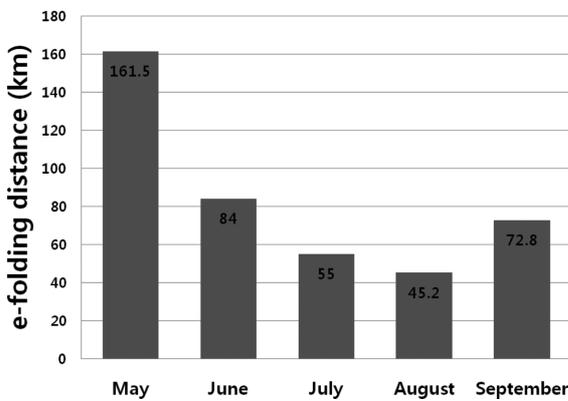


Fig. 12. The same as Fig. 10 but for hourly precipitation.

은 시간의 강수가 국지적으로 많이 발생하며, 8월의 시간 강수에 대한 e-folding 거리가 가장 짧은 것으로 보아 가장 무더운 8월에 국지적인 호우가 가장 빈번하게 발생함을 알 수 있다.

일 강수의 e-folding 거리 공간분포(Fig. 13)를 월별로 살펴보면, 5월(Fig. 13a)은 충청남도와 전라북도 그리고 대구주변 지역으로 약 330 km 이하로 나타났으며, 경기북부, 강원내륙과 영남 일부지역으로 약 410 km 이상의 e-folding 거리가 나타났다. 6월(Fig. 13b)은 중부내륙과 영남 일부지역에서 약 290 km의 최소 e-folding이 나타났으며, 영남해안 지역과 높은 산이 위치하는 국소지역으로 약 330 km 이상이 나타났다. 그리고 7월(Fig. 13c)은 전체적으로 약 250 km 이하의 분포를 보였으며, 지리산과 속리산이 위치하는 지역과 창원 주변 국소지역으로 최대값이 나타났다. 8월(Fig. 13d)의 경우는 e-folding 거리의 지역적인 편차가 크게 나타났는데, 전반적으로 경기도와 호남 지역을 잇는 지역으로 약 210 km 이하의 최소값이 분포하였으며, 강원남부와 경상북도 지역으로 최대값이 나타났다. 9월(Fig. 13e)은 경기북부 지역으로 약 210 km 이하가 나타났으며, 경기남부 지역으로 그 이상의

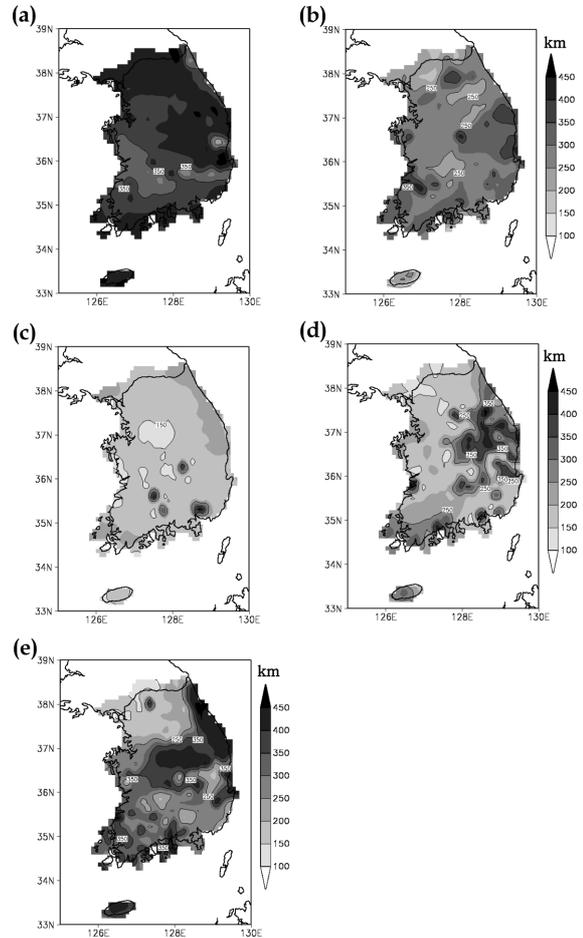


Fig. 13. Distribution of 13-years long, from 1998 to 2010, average of the e-folding distance of daily precipitation over Korea for a) May, b) June, c) July, d) August, and e) September.

값이 나타났다. 전체적으로 일 강수의 e-folding 거리 분포는 태백산맥과 지리산 지역처럼 높은 산맥이 위치하는 곳에서 크게 나타났으며, 서쪽에서 상대적으로 짧은 e-folding 거리의 분포를 보였다.

시간 강수의 e-folding 거리 공간분포(Fig. 14)는 일 강수의 e-folding 공간분포(Fig. 17)와 같이 태백산맥을 기준으로 서쪽은 작게 나타났고 동쪽은 크게 나타났다. 이러한 분포패턴은 일 강수보다 더 명확하게 나타났다. 5월(Fig. 14a)은 경기도와 호남 일부지역으로 약 150 km 이하의 e-folding 거리 분포가 나타났으며, 영남 일부와 남해안 지역으로는 175 km 이상의 e-folding 거리 분포를 보였다. 6월(Fig. 14b)은 경기북부와 서해남부 지역으로 약 75 km 이하로 나타났으며, 강원영동을 포함한 동해안으로는 약 100 km 이상

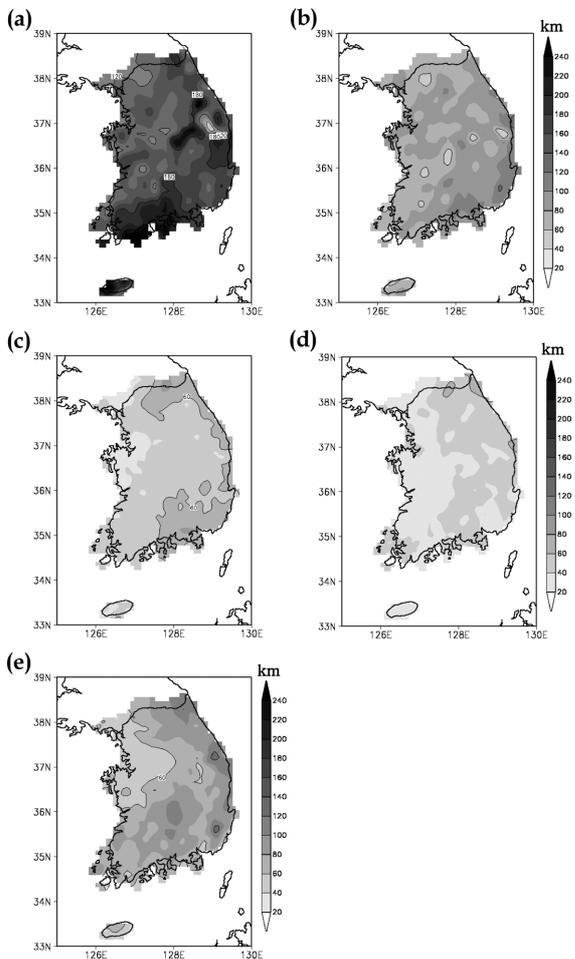


Fig. 14. The same as Fig. 13 but for hourly precipitation.

의 상대적으로 큰 e-folding 거리가 나타났다. 7월과 8월(Figs. 14c, d)은 경기도와 호남 지역으로 약 50 km와 40 km로 작은 e-folding 거리 분포를 보였으며, 동해안으로 상대적으로 큰 e-folding 거리 분포를 보였다. 그리고 9월(Fig. 14e)은 경기도와 충청도 지역에 약 60 km 이하로 나타났고, 그 외 지역에서 약 80 km 이상으로 나타났다.

위와 같은 e-folding 거리의 지역적 분포 특성은 Ha et al. (2007)에서 제시한 결과와 유사함을 확인하였다. Ha et al. (2007)은 복잡한 산악지형에서 평지보다 오히려 e-folding 거리가 더 큼을 밝혔다. 즉, 7·8월에 태백산맥 서쪽 지역에서 지역적 편차가 큰 국지성 호우가 발생할 가능성이 크다는 의미이다. 이에 대한 이유로는 한반도의 여름철 국지성 강수는 산악의 지형성 강제력 보다는 서해안에서부터 발생하여 전파되는 중규모 대류계(Mesoscale Convective System)의 이동

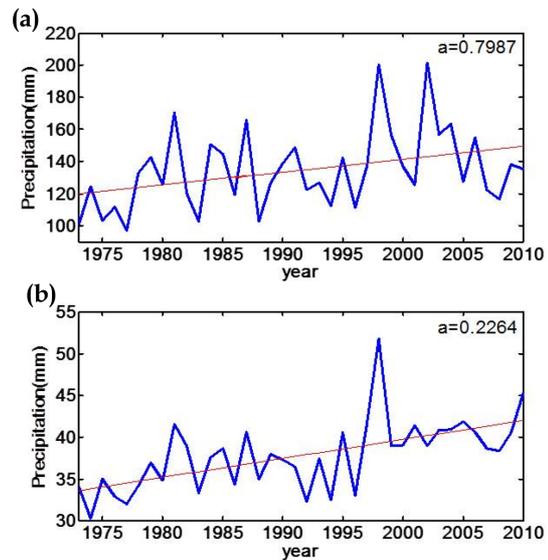


Fig. 15. Plots of annual (a) daily and (b) hourly maximum precipitation averaged over ASOS sites in Korea during the ASOS data length period of from 1973 to 2010.

과정에 발달과 쇠퇴가 반복적으로 일어나는 것과 연관 지어 생각해 볼 수 있다. 그러한 대류계의 자체적인 역학 메커니즘에 의한 발달 성쇠는 산악지형보다 평야 지형에서 더 원활히 작용할 가능성이 있기 때문이다. 이에 대한 설명과 규명은 중규모 모델링 연구를 통해 수행되어야 할 것이다.

3.3 확률강우량

한반도의 극한 강수의 변화를 살펴 보기 위해 ASOS 61개 지점의 38년 동안(1973년~2010년)의 일·시간 강수 최대값의 변화를 살펴보았다. 여기서 연별 변화는 ASOS지점 평균 일·시간 최대 강수량을 이용하여 시계열로 나타냈으며, 공간분포는 ASOS지점별 38년 평균 일·시간 최대 강수량을 이용하여 나타냈다. 시간적인 변화 추이를 나타낸 Fig. 15을 보면, 일 최대 강수량(Fig. 15a)과 시간 최대 강수량(Fig. 15b)이 뚜렷하게 증가한 것을 볼 수 있다. 일 최대 강수의 38년 평균 공간분포(Fig. 16a)를 보면, 경기북부와 강원영동을 포함한 강원남부와 남해안 지역으로 평균적으로 약 160 mm 이상의 일 최대강수가 발생한 것으로 나타났고, 영남 지역은 약 110 mm day⁻¹ 이하의 일 최대강수가 발생하는 것으로 나타났다. 평균 시간 최대 강수의 공간분포(Fig. 16b)에서는 경기북부, 충청남도과 남해안 지역에서 평균 약 42 mm 이상의 시간 최대 강수가 발생하였으며, 강원북부, 강원영동, 영남 지역에는 시간 최대 강수의 평균이 약 33 mm 이하로

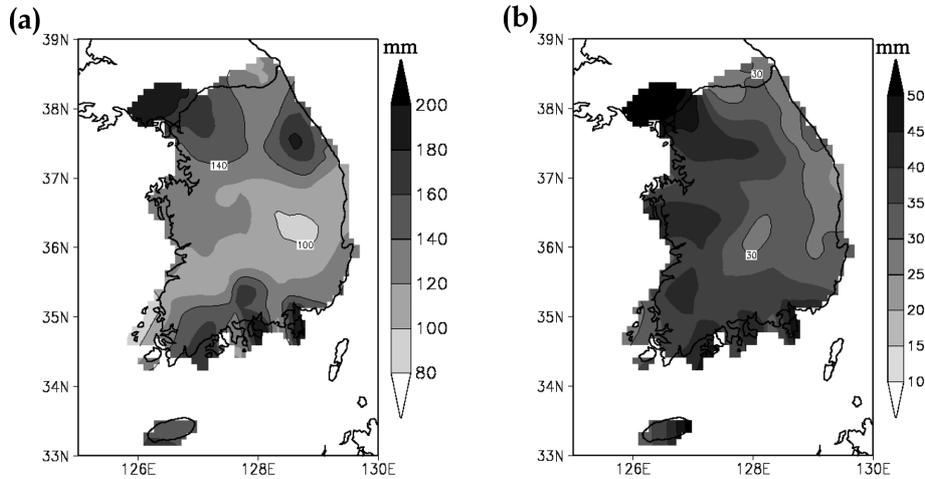


Fig. 16. Distribution of 38-years long, from 1973 to 2010, average of annual maximum of a) daily precipitation and b) hourly precipitation produced from ASOS observations in Korea.

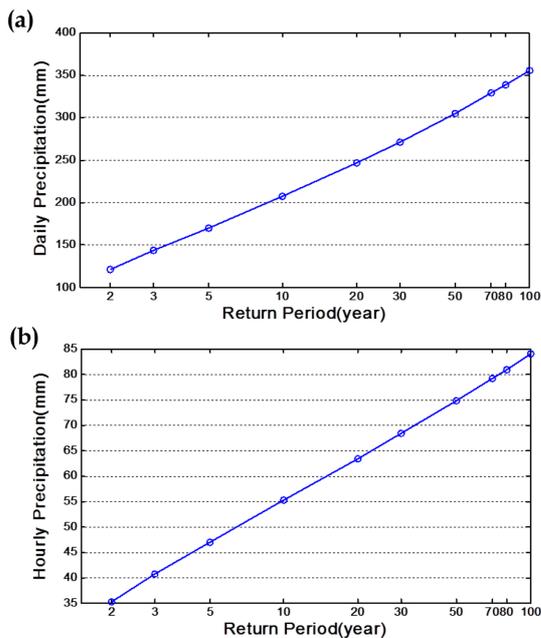


Fig. 17. Graphs showing the (a) daily and (b) hourly probable precipitation amounts for given return-periods.

나타났다.

위의 결과로 보아 일 최대 강수와 시간 최대 강수는 38년 동안 증가하는 경향을 보였으며, 경기북부와 남해안 지역은 일시간 최대 강수 평균 모두 크게 나타났다고, 강원남부산간 지역의 일 최대 강수의 평균은 크게 나타났지만 시간 최대 강수의 평균은 가장 작은 값을 보였다. 이 결과는 앞의 총 강수량과 일·시간

강수 빈도의 분포 결과와도 일치한다. 그러므로 앞에서 언급되었듯이 남해안은 강한 강수가 빈번하게 발생하고 강원남부산악 지역은 약한 강수가 자주 발생한다는 것을 다시 확인 할 수 있었다.

Figure 17은 FARD2006을 통해 계산된 재현기간별 확률 강우량이다. 재현기간에 일어날 수 있는 강우량을 나타낸 그래프로 일 강수의 확률 강우량(Fig. 17a)을 보면 약 250 mm day^{-1} 는 20년에 한번 내릴 수 있는 강수이며, 약 300 mm day^{-1} 는 50년에 한번 내릴 수 있는 강수로 분석되었다. 그리고 약 360 mm day^{-1} 는 100년에 한번 내릴 수 있는 강수로 분석 되었다. 시간 강수의 확률 강우량(Fig. 17b)은 약 70 mm h^{-1} 는 20년에 한번 나타나는 강도이며, 약 80 mm h^{-1} 는 100년에 한번 나타날 수 있는 강수로 분석되었다.

확률 강우량의 공간적인 분포를 살펴보기 위해 재현기간 100년의 공간분포(Fig. 18)를 살펴보았는데, 그 분포 패턴은 일·시간 최대 강수량의 공간분포(Fig. 16)와 유사하였다. 일강수의 재현기간 100년의 확률 강우량 공간분포도(Fig. 18a)를 보면 강원남부와 남해안 일부지역에서 약 400 mm 이상으로 강하게 나타났다. 이는 온난화와 관련된 국지적이고 지형적인 영향에 의한 강수가 나타나는 산악지형과 관련이 있을 수 있다(Giorgi *et al.*, 1994; Park *et al.*, 2011). 반면 영남과 호남 일부지역에서는 약 250 mm 이하로 약하게 나타났다. 시간 강수의 재현기간 100년의 공간분포(Fig. 18b)는 경기북부, 충청도와 남해안 지역을 따라 약 90 mm 이상으로 강하게 나타났으며, 강원남부 산악지역과 영남 지역은 약 60 mm 이하의 약한 확률 강우량이 분포하였다. 이 결과로 보았을 때, 남해안은 다른 지역에 비해 일시간 강도가 강한 강수가 발생

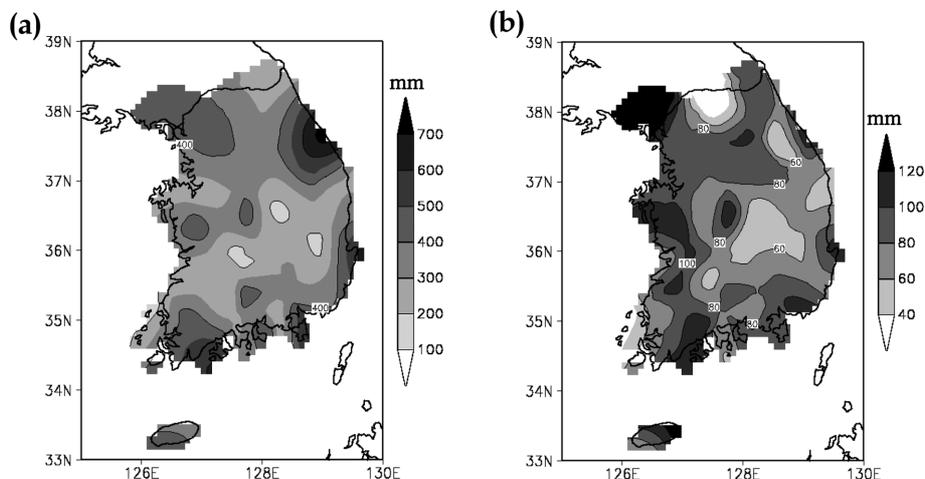


Fig. 18. Distribution of probable precipitation amount, (a) per day and (b) per hour, that has return period of 100 years in Korea, calculated using FARD2006 where the 38-years long ASOS data are used as input.

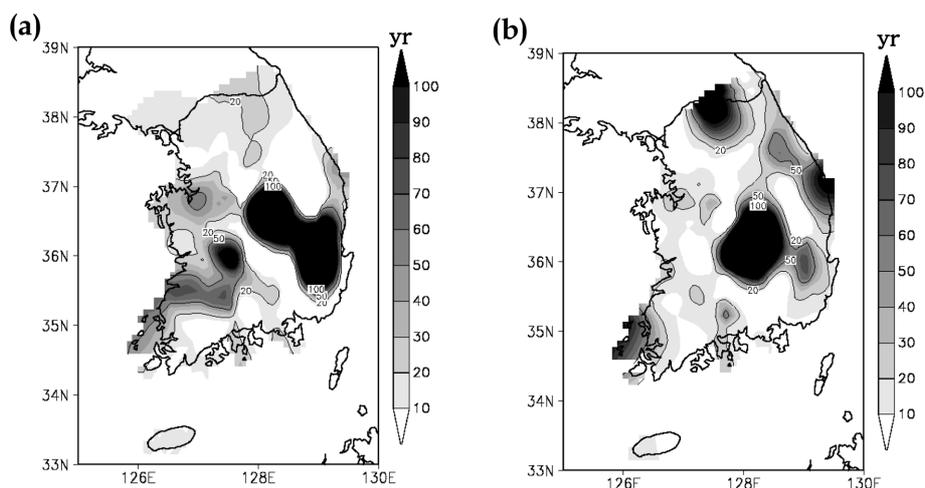


Fig. 19. The distribution in Korea of the return-periods for probable amount of (a) daily precipitation of 220 mm and (b) hourly precipitation of 55 mm, calculated using FARD2006 where the 38-years long ASOS data are used as input.

할 수 있으며, 강원남부 지역은 일 강도는 강하지만 시간 강도는 약한 강수가 발생 할 수 있음을 알 수 있다. 이는 앞의 38년 평균 강수 강도빈도의 분포와도 일치하는 결과로 확률 강우량의 결과와 종합해 보면, 남해안은 강한 강수가 발생하여 일 강수가 많아 질 수 있음을 알 수 있으며, 강원남부 지역은 지속시간이 긴 약한 강수에 의해 일 강수량이 많아질 수 있음을 알 수 있다.

강수 강도에 따른 재현기간의 공간적인 특징을 살펴 보기위해 220 mm day⁻¹ 이상이 발생 할 수 있는 각 지점별 재현기간과 55 mm h⁻¹ 이상이 발생할 수

있는 각 지점의 재현기간에 대한 공간분포를 살펴보았다. 이러한 강도를 선택한 이유는 현재 기상청 호우 주의보의 기준이 12시간에 110mm이므로 일 강수 확률 강우량을 220 mm day⁻¹로 하였으며, 시간 강수의 경우 10 mm h⁻¹로 하여야 하지만 시간 강수의 최소 확률 강우량이 약 35 mm h⁻¹이기 때문에 일강수의 확률 강우량 220 mm day⁻¹의 재현기간과 같은 재현기간 10년의 시간 강수의 확률 강우인 55 mm h⁻¹를 선택하여 공간적인 특징을 살펴보았다.

확률 강우량의 재현기간을 공간적으로 나타낸 Fig. 19을 보면, 220 mm day⁻¹ 이상의 강우가 발생할 수

있는 재현기간(Fig. 19a)은 경상북도와 충청북도, 전라북도 일부지역에서 약 80년 이상으로 크게 나타났으며, 다른 지역은 20년 이하의 분포를 보였다. 그리고 55 mm h^{-1} 이상의 강우가 발생할 수 있는 재현기간(Fig. 19b)은 강원 북부, 경상북도 동해안과 충청북도 지역에서 80년 이상으로 큰 재현기간이 나타났으며, 서해안과 남해안 지역으로는 20년 이하의 재현기간이 나타났다. 이 결과들로 보았을 때, 경기도를 포함하는 서해안 지역과 남해안 지역은 일·시간 단위의 극한 강수가 발생할 확률이 높으며, 충청북도와 경상북도 지역은 극한 강수가 발생할 확률이 낮은 것으로 나타났다. 그리고 강원북부와 강원영동지역은 일 단위의 극한 강수의 발생 확률은 높으나, 시간 단위의 극한 강수의 발생 확률은 상대적으로 낮게 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상청의 ASOS와 AWS의 강수관측 자료를 사용하여 여름철 한반도의 강수 특성을 복합적인 관점에서 살펴보기 위해 첫째, 월별 총 강수량, 강수 강도 및 강수 빈도의 연변화와 지역적인 분포를 분석하였고, 둘째, e-folding 거리 분석을 통해 국지성 정도를 월별로 비교하였으며, 마지막으로 한반도 확률강수량의 지역적 분포와 재현주기(return period)를 분석하였다.

여름철 강수량 분포특성의 경우, 주로 서쪽 지역에 상대적으로 많은 강수가 분포하며, 경기도와 남해안(제주 포함)이 최대 강수량 지역으로 나타났다. 최대 강수량의 분포축이 소백산맥 축과 일치하거나 지리산과 같은 산악지역 주변에 국소 최대값이 나타남으로써, 산악의 지형성 극한 강수의 발생이 강수량 분포 특성에 연관되어 있음 또한 확인되었다. 이러한 분석 결과는 선행연구 결과와 거의 일치하는 것이며, 강원남부의 국소 강수 최대값은 다우지역인 경기도의 풍하층에 위치한 것과 지형성 강제력에 의한 것으로 사료되지만 정확한 규명을 위해 더 상세한 연구가 진행되어야 할 것이다.

강수량·강도·빈도의 연변화 추세 분석에 의하면, 모든 월에서 최근 38년 기간(1973년~2010년)에 월 평균 강수량이 계속 증가하는 추세였고, 7월의 증가가 가장 뚜렷하게 나타났다. 6월의 강수량 증가추세는 다른 월에 비해 미미했고, 이는 6월의 강수 강도(증가)와 강수 빈도(감소)의 상쇄효과 때문인 것으로 사료된다. 7월과 8월은 강수 강도와 빈도 모두가 증가하는 추세였지만, 7월의 강수량 증가 추세는 강수 강도가 주도하였고, 8월의 강수량 증가 추세는 강수 빈도 증가가 주도한 것으로 분석되었다.

강수의 강도와 빈도의 지역적 분포 특성 분석 결과,

일강수와 시간 강수의 분포특성에 큰 차이가 드러나지 않았으며 대체로 강수량 분포와 일치하였다. 이는 선행연구에서 언급한 바와 같이 여름철 한반도 기압계가 대륙으로부터 유입되거나 장마전선의 이동에 따라 남북으로 이동하는 것과 관련이 있다고 보았다.

여름철 강수의 국지성 정도를 분석한 결과, 7월과 8월은 강수의 국지성이 상대적으로 더 커서 짧은 시간의 강수가 국지적으로 많이 발생하며, 8월의 시간 강수에 대한 e-folding 거리가 가장 짧은 것으로 보아 가장 무더운 8월에 국지적으로 짧은 시간에 발생하는 호우가 가장 빈번함을 확인하였다. 또한, 복잡한 산악 지형보다 오히려 평지에서 지역적 편차가 큰 국지성 호우가 발생할 가능성이 크다는 선행연구와 일치하는 결과를 얻었고, 이에 대한 이유로는 서해안에서부터 발생하여 전파되는 중규모 대류계(Mesoscale Convective System)의 이동 과정에 발달과 쇠퇴가 반복적으로 일어나는 것과 연관 지어 생각해 보았다. 하지만, 이에 대해서는 추후 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

확률강수량의 분석 결과, 약 360 mm day^{-1} 가 100년에 한번 내릴 수 있는 강우 강도로 분석 되었으며, 시간 강수의 확률 강수량의 경우 약 80 mm h^{-1} 가 100년에 한번 나타날 수 있었다. 재현기간 100년의 강우 강도의 공간분포에서는 강원남부와 남해안 일부지역에서 약 500 mm day^{-1} 로 강하게 나타났으며, 경상북도와 전라북도 지역에서 강도가 약함을 볼 수 있었다. 시간 강수의 경우 서해안과 남해안 일부지역이 약 100 mm h^{-1} 로 강하게 분포하였고, 강원남부산간과 영남지역에서 강도가 약하게 나타났다. 220 mm day^{-1} 의 지점별 재현기간의 분포는 경상북도와 충청북도, 전라북도 일부지역의 재현기간이 크게 나타났고, 55 mm h^{-1} 의 경우 강원 북부, 경상북도 동해안과 충청북도 지역에서 크게 나타났다.

이 연구에서는 일·시간 강수의 월별 시·공간적인 특성과 강수의 국지성을 분석하였고, 극한 강수의 발생 가능성을 알아보자 확률 강수량을 공간적으로 분석하였다. 이러한 결과들은 강수의 기후학적인 특징뿐만 아니라 다양한 특징들을 전반적으로 이해하는데 도움이 될 수 있을 것이다. 그러나 강수의 국지성 연구에서는 강수 강도가 고려되지 않았기 때문에 집중호우와 같은 극한 강수의 국지성을 설명하기에는 부족함이 있다. 따라서 강수 강도를 고려하여 분석한다면 최근 발생하고 있는 기록적인 강수의 발생 특성과 국지성을 이해하는 데 도움이 될 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상연구소 주요사업(NIMR-2012-B-7)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Giorgi, F., C. S. Broudeur, and G. T. Bates, 1994: Regional Climate Changes Scenarios over the United States Produced with a Nested Regional Climate Model. *J. Climate*, **7**, 375-399.
- Ha, K.-J., E.-H. Jeon, and H.-M. Oh, 2007: Spatial and temporal characteristics of precipitation using an extensive network of ground gauge in the Korean Peninsula. *Atmos. Res.*, **86**, 330-339.
- Ho, C.-H., and I.-S. Kang, 1988: The Variability of Precipitation in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 38-48.
- Hong, K.-O., M.-S. Shu, and D.-K. Rha, 2006: Temporal and Spatial Variations of Precipitation in South Korea for REcent 30 Years (1976-2005) and Geographic Environments. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **27**, 433-449.
- Kim, E.-H., M.-K. Kim, and W.-S. Lee, 2005: The regional characteristics of daily precipitation intensity in Korea for recent 30 years. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **26**, 404-416.
- Kim, G., and J. P. Kim, 2011: Characterization of the variability of summer extreme precipitation according to the local features. *J. Korean Soc. Civil Engineers*, **31**, 129-146.
- Lee, G.-H., and K.-H. Seo, 2008: Analysis of diurnal and semidiurnal cycle of precipitation over South Korea. *Atmosphere*, **18**, 475-483.
- Lee, K., H.-J. Baek, C. H. Cho, and W.-T. Kwon, 2011: The recent (2001-2010) changes on temperature and precipitation related to normals (1971-2000) in Korea. *Geogr. J. Korea*, **45**, 237-248.
- Lee, S., and W.-T. Kwon, 2004: A variation of summer rainfall in Korea. *Geogr. J. Korea*, **39**, 819-832.
- NIDP, 1998: Development of Program for Frequency Analysis of Rainfall Data (FARD). *J. Korea Water Resources Association*, 66-120.
- NIMR, 2011: Meteorological Disasters Special Report 2010-2011. *NIMR*, 21-22.
- Park, J.-H., H.-S. Kang, Y.-S. Lee, and M.-K. Kim, 2011: Changes in the extreme daily rainfall in South Korea. *Int. J. Climatol.*, **31**, 2290-2299.
- Yun, Y.-N., 2007: *Hydrology: The Basics and Applications*. Cheong Moon Gak Publishing Co., 837-857.